

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра астрофизики и звёздной астрономии

На правах рукописи  
УДК 524.352; УДК 524.354

Пружинская Мария Викторовна

## Сверхновые звёзды, гамма-всплески и ускоренное расширение Вселенной

Специальность: *01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия*

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., профессор  
Липунов Владимир Михайлович

Москва 2014

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>4</b>
Общая характеристика работы . . . . .	8
Актуальность работы . . . . .	8
Цели работы . . . . .	9
Новизна работы . . . . .	10
Практическая значимость работы . . . . .	11
Положения, выносимые на защиту . . . . .	11
Публикации . . . . .	12
Апробация работы . . . . .	13
Личный вклад автора . . . . .	14
Структура и обзор диссертации . . . . .	15
<b>1 Сверхновые звёзды типа Ia</b>	<b>18</b>
1.1 Индикаторы расстояний во Вселенной . . . . .	18
1.2 «Стандартизация» свечи . . . . .	21
1.3 Обработка SN 2009nr в программе SNooPy . . . . .	31
1.3.1 Описание программы SNooPy . . . . .	31
1.3.2 К-поправка . . . . .	33
1.3.3 SN 2009nr . . . . .	36
1.4 Механизмы взрыва . . . . .	38
1.4.1 Основные механизмы . . . . .	38
1.4.2 Механизмы взрыва в эллиптических галактиках . . . . .	39
1.5 «Чистые» сверхновые . . . . .	44
1.5.1 Метод отбора . . . . .	46
1.5.2 Анализ диаграммы Хаббла . . . . .	49
1.6 Обсуждение . . . . .	52
<b>2 Поляризация сверхновых звёзд типа Ia и гамма-всплесков</b>	<b>56</b>
2.1 Роботизированная сеть МАСТЕР . . . . .	57
2.2 Инструменты МАСТЕР и обработка наблюдений . . . . .	58
2.3 Калибровка поляроидов по блазарам . . . . .	60
2.3.1 Блазар ОС 457 . . . . .	61
2.3.2 Блазар ЗС 454.3 . . . . .	62

2.3.3	Блазары 87GB165943.2 +395846 и QSOB1215 +303 .	62
2.4	Поляризация сверхновых звёзд типа Ia . . . . .	66
2.4.1	Наблюдения поляризации SN Ia . . . . .	66
2.4.2	SN 2012bh . . . . .	67
2.5	Поляризация гамма-всплесков . . . . .	70
2.5.1	Наблюдения поляризации гамма-всплесков . . . . .	70
2.5.2	GRB 121011A . . . . .	74
2.6	Обсуждение . . . . .	78
<b>3</b>	<b>Короткие гамма-всплески и связанные с ними явления</b>	<b>80</b>
3.1	Машина Сценариев и частота слияний нейтронных звёзд .	81
3.2	Слияния нейтронных звёзд и быстрые радиовспышки . . .	86
3.3	Слияния нейтронных звёзд и короткие гамма-всплески . .	90
3.4	Молчание LIGO . . . . .	91
3.5	Обсуждение . . . . .	94
	<b>Заключение</b>	<b>96</b>
	<b>Благодарности</b>	<b>98</b>
	<b>A МАСТЕР: наблюдение сверхновых звёзд</b>	<b>99</b>
	<b>B Абсолютные калибровки МАСТЕР в поляроидах и <i>BVRI</i> фильтрах</b>	<b>101</b>
	<b>Список литературы</b>	<b>114</b>

# Введение

Работа посвящена сверхновым звёздам и гамма-всплескам. Катастрофические события, ответственные за эти явления, представляют интерес для различных областей астрофизики, космологии и физики элементарных частиц. Сверхновые звёзды и гамма-всплески играют огромную роль в общей картине эволюции звёзд, галактик, химической эволюции Вселенной, а также в наблюдательной космологии.

Вспышка сверхновой звезды — один из самых мощных и красивых процессов природы. На Земле вспышка сверхновой регистрируется как резкое увеличение блеска звезды на 6–10 порядков. Таким образом, какое-то время одна звезда светит как целая галактика. История сверхновых началась в тот момент, когда была установлена внегалактическая природа туманностей, названных впоследствии галактиками. В 1934 году Уолтер Бааде и Фриц Цвикки для подобных объектов предложили термин «сверхновые» [1].

Перед тем как делать выводы о природе процесса, необходимо исследовать его наблюдательные проявления. Первое, что заинтересовало исследователей сверхновых — одинаковы ли они, а если нет, то насколько отличаются и поддаются ли классификации. В 1940 году Минковский разделил сверхновые на два основных типа по их спектральным свойствам: I — в спектрах которых отсутствуют линии водорода и II — в спектрах которых эти линии есть [2]. Самым непонятным и почти полностью не расшифрованным долгое время оставался спектр сверхновых I типа (СН I). Только после того, как Юрий Павлович Псковский показал, что полосы в спектрах — это участки непрерывного спектра между широкими и довольно глубокими линиями поглощения, отождествление спектров СН I сдвинулось с мёртвой точки [3]. Позднее СН I были разделены на подтипы: Ia — в спектрах присутствуют линии однократно ионизованного кремния; Ib — в спектрах практически отсутствуют линии однократно ионизованного кремния, а наиболее интенсивными являются линии поглощения гелия; Ic — в спектрах отсутствуют и линии кремния, и линии гелия.

Сверхновые типа II, Ib и Ic — результат эволюции массивных звёзд с массой  $> 8\text{--}10 M_{\odot}$ . Когда ядро звезды становится железным, выделе-

ние энергии в нём прекращается, поскольку образование ядер тяжелее железа требует затрат энергии. Ядро больше не может сопротивляться гравитации и коллапсирует. Но если вещество ядра звезды в результате сжатия превратится в нейтроны, то оно сможет противостоять коллапсу. Звезда превращается в нейтронную звезду. В самых массивных звёздах давление вырожденных нейтронов не останавливает сжатие, и они коллапсируют в чёрную дыру. При этом выделяется огромная энергия, которая в конечном счёте переходит в тепловую и кинетическую энергию оболочки. Этот процесс мы и наблюдаем как вспышку сверхновой. Если эволюция звезды происходила спокойно, и в оболочке звезды сохранилось достаточное количество водорода, то вспышка отождествляется со сверхновой II типа; если по каким-то причинам звезда потеряла часть своей оболочки, то мы увидим сверхновую Ib или Ic. Что касается природы сверхновых типа Ia (СН Ia), то наиболее удачной здесь представляется модель термоядерного взрыва белого карлика с массой, приблизительно равной массе Чандрасекара.

Насколько часто вспыхивают сверхновые, и каким образом они распределены в галактиках? Во-первых, ни одна из галактик не наблюдалась необходимое количество времени. Во-вторых, пыль и газ поглощают значительную часть света, идущего от сверхновой. В-третьих, почти одновременные для нас вспышки могут быть разделены большим промежутком времени: свет от сверхновых проходит разный путь внутри галактики, а её размеры в световых годах намного больше, чем время наблюдений. Поэтому частоту вспышек сверхновых оценивают по наблюдениям совокупности галактик, принимая во внимание различие галактик в массе и светимости, а также по морфологическому типу. Последние работы, основанные на объединении данных нескольких программ поиска сверхновых, показали, что в эллиптических галактиках наблюдаются только СН Ia, и в «средней» галактике со светимостью  $10^{10} L_{\odot}$  одна сверхновая вспыхивает примерно раз в 500 лет. В такой же по светимости спиральной галактике СН Ia вспыхивают с лишь немного более высокой частотой, однако к ним добавляются сверхновые типов II и Ib/c, и общая частота вспышек получается примерно раз в 100 лет. Частота вспышек пропорциональна светимости галактик: в гигантских

галактиках она выше. Распределения сверхновых всех типов по расстоянию от центров галактик мало различаются между собой и сходны с распределением светимости — плотность падает от центра к краям по экспоненциальному закону. Различия между типами сверхновых проявляются в распределении относительно областей звездообразования: если к спиральным рукавам концентрируются сверхновые всех типов, то к областям H II — только сверхновые типов II и Ib/c. Однако СН Ia наблюдаются и в эллиптических галактиках, где интенсивное звездообразование отсутствует уже миллиарды лет.

Начало широкого применения в астрономии ПЗС-приёмников позволило существенно увеличить количество и качество наблюдательного материала. Сейчас известно около 6000 спектрально подтверждённых сверхновых звёзд.

Большая часть настоящего исследования посвящена изучению сверхновых звёзд типа Ia. СН Ia имеют наиболее универсальные кривые блеска среди всего класса сверхновых звёзд, поэтому прекрасно подходят для задач наблюдательной космологии. По наблюдению далёких СН Ia было открыто ускоренное расширение Вселенной [4, 5]. Раньше считали, что под действием сил тяготения разбегание галактик может только замедляться. Но ускорение обозначило появление в природе новой силы — «антигравитации», которая в данный момент преобладает над гравитацией. Антитяготение создаётся не обычным веществом, а особой космической энергией — тёмной энергией, в которую погружены все галактики. Тёмная энергия не взаимодействует с излучением, её физическая природа и структура совершенно не известны. Тёмную энергию часто связывают с космологической постоянной, введённой в космологию Альбертом Эйнштейном. Есть ряд проблем, связанный с использованием СН Ia в качестве стандартной свечи, поэтому детальные фотометрические, спектральные и, в частности, поляризационные измерения очень важны для сверхновых этого типа.

Другие уникальные взрывы — это гамма-всплески, которые кроме высоких энергий выделяются ещё и тем, что в них ускоряется огромный поток вещества в виде релятивистских струй (джетов).

Атмосфера Земли не пропускает гамма-излучение, поэтому открытие гамма-всплесков стало возможным только с началом космической эры. Впервые гамма-всплески были зарегистрированы в 1967 году американскими военными спутниками Вела, которые были запущены для отслеживания испытаний ядерного оружия на Земле [6]. Информация о гамма-всплесках накапливалась довольно медленно. Прорыв в исследованиях произошёл в конце 70-х годов XX века. В советском эксперименте Конус, проведённом на межпланетных станциях Венера-11 — Венера-14, было показано, что гамма-всплески имеют бимодальное распределение [7, 8]. Кроме того, было установлено, что распределение гамма-всплесков по небу носит случайный характер, однако из-за недостаточной статистики уверенных выводов о пространственном распределении сделать было нельзя. Следующий шаг был сделан после вывода на орбиту космической гамма-обсерватории Комптон в 1991 году [9]. Установленный на её борту гамма-детектор BATSE за 9-летнюю миссию регистрировал в среднем по одному событию в день [10]. Новые данные подтвердили вывод о том, что гамма-всплески не концентрируются к плоскости Галактики, а распределены по небу однородно. Этот результат, ранее полученный в эксперименте Конус, оказался сильным аргументом в пользу гипотезы внегалактического происхождения гамма-всплесков.

Подтверждение этой гипотезы окончательно пришло в 1997 году, когда итало-голландский спутник ВерроSAX зарегистрировал гамма-всплеск GRB 970228 [11]. С помощью установленного на борту рентгеновского телескопа удалось обнаружить рентгеновское излучение от источника и определить координаты с гораздо лучшей точностью. Наземные оптические телескопы продолжили наблюдение оптического послесвечения всплеска и уточнили координаты. Глубокий снимок с космического телескопа Хаббл выявил на этом месте галактику с красным смещением  $z = 0.695$  [12]. Самый далёкий на сегодняшний день гамма-всплеск GRB 090429B пришёл с  $z \sim 9.4$  [13].

Различают два основных типа гамма-всплесков: длинные ( $> 2$  секунд) и короткие ( $< 2$  секунд). Физические механизмы, лежащие в основе этих двух типов, вероятно, различны. Для объяснения коротких гамма-всплесков была предложена модель сливающихся нейтронных звёзд или

нейтронной звезды и чёрной дыры [14, 15]. Короткие гамма-всплески являются одним из главных кандидатов на обнаружение гравитационных волн в наземных проектах типа LIGO, Virgo и др. [16].

Примерно 70% зарегистрированных гамма-всплесков имеют продолжительность более 2 секунд. Большинство хорошо изученных длинных гамма-всплесков наблюдалось в галактиках с интенсивным звездообразованием, вероятно, их можно связать со сверхновыми Ib/c. Причиной длинных гамма-всплесков является коллапс ядра массивной звезды в чёрную дыру. Известно уже много длинных гамма-всплесков, после которых наблюдалась вспышка сверхновой [17].

Излучение гамма-всплесков, возможно, имеет синхротронную природу. Синхротронное излучение является причиной возникновения поляризации. Таким образом, измерение поляризации может привести к объяснению механизмов взрыва, ответственных за возникновение гамма-всплесков.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Сверхновые звёзды и гамма-всплески — самые мощные взрывы во Вселенной. Благодаря высокой светимости эти объекты можно наблюдать на космологических расстояниях и вследствие этого использовать их для изучения свойств и структуры Вселенной. В последние десятилетия объём наблюдательного материала возрос в десятки раз, но некоторые ключевые моменты, связанные с природой и механизмами взрывов сверхновых звёзд и гамма-всплесков, так и остались загадкой. Считается, что блеск сверхновых звёзд типа Ia в максимуме постоянен, и поэтому они прекрасно подходят на роль индикаторов расстояний во Вселенной. Однако существуют сомнения в верности гипотезы стандартной свечи. Основные причины этих сомнений связаны с поглощением света в нашей галактике и родительских галактиках сверхновых, химическим составом звёзд-прародителей, эволюцией суммарной массы сливающихся белых карликов с хаббловским временем, возможным существованием нескольких механизмов взрыва, эффектами селекции [18]. И действи-

тельно, для СН Ia наблюдается довольно большая дисперсия абсолютной звёздной величины в максимуме блеска. Существующие процедуры «стандартизации» СН Ia позволяют учесть только часть из перечисленных выше факторов. Поэтому усовершенствование методов «стандартизации» и выделение различных однородных подклассов СН Ia будут актуальны ещё долгое время. Выявить механизм взрыва СН Ia и ответить на вопрос о структуре магнитных полей в джетах гамма-всплесков могут измерения поляризации. К сожалению, поляризационных наблюдений СН Ia, особенно на ранних стадиях расширения оболочки, и собственного и раннего оптического излучения гамма-всплесков мало [19]. Поляризация собственного оптического излучения гамма-всплесков ещё не была зарегистрирована; существует лишь несколько измерений поляризации послесвечений.

Другим способом приблизиться к пониманию природы сверхновых и гамма-всплесков является популяционный синтез. Сравнивая результаты моделирования и наблюдений, можно наложить некоторые ограничения на возможные механизмы взрыва и предсказать/объяснить новые астрофизические явления (например, быстрые радиовспышки).

## Цели работы

Целью данной работы является изучение сверхновых звёзд типа Ia как индикаторов расстояний во Вселенной и гамма-всплесков с помощью популяционного синтеза и поляризационных наблюдений, выполненных на телескопах роботизированной сети МАСТЕР [20, 21, 22, 23]. Для её реализации были поставлены и решены следующие задачи:

- Исследование влияния серого поглощения на ослабление блеска СН Ia.
- Выделение наиболее однородного подкласса СН Ia, не требующего дополнительной «стандартизации»; составление выборки, удовлетворяющей принятым критериям.
- Изучение современных методов «стандартизации» СН Ia и выбор наиболее подходящего из них для обработки «чистой» сверхновой СН 2009nr.

- Исследование механизмов взрыва СН Ia в эллиптических галактиках.
- Калибровка поляроидов роботизированной сети МАСТЕР в Кисловодске, Тунке и Благовещенске.
- Поляризационные наблюдения сверхновых звёзд и гамма-всплесков с помощью роботизированной сети МАСТЕР.
- Расчёт частоты слияния нейтронных звёзд, основанный на результатах популяционного синтеза, с учётом реалистичной функции звёздообразования во Вселенной. Сравнение результатов расчёта с наблюдаемой частотой быстрых радиовспышек.

### Новизна работы

- В работе впервые предложен способ исключить влияние серого поглощения, различий в химическом составе и механизмах взрыва СН Ia на построение шкалы расстояний во Вселенной.
- Впервые показано, что наблюдаемая эволюция частоты СН Ia в эллиптических галактиках хорошо согласуется с частотой слияния белых карликов, предсказанной популяционным синтезом двойных звёзд с помощью Машины Сценариев [24, 25].
- Впервые проведена калибровка поляроидов роботизированной сети МАСТЕР и исследованы её поляризационные возможности на примере блазаров, сверхновой и гамма-всплеска.
- Поскольку МАСТЕР — это единственный в мире широкопольный инструмент, способный измерять поляризацию, то поляризационные измерения гамма-всплеска GRB 121011A являются уникальными.
- В ходе исследования впервые представлена эволюция частоты слияний нейтронных звёзд как функция красного смещения в рамках реалистичной функции звёздообразования во Вселенной.

## Практическая значимость работы

- Предложенный подкласс «чистых» сверхновых может быть использован при планировании будущих миссий по поиску сверхновых звёзд и изучению свойств ускоренного расширения Вселенной.
- Подтверждение ускоренного расширения Вселенной по «чистым» сверхновым опровергает работы, в которых серое поглощение вводится как альтернатива ускоренному расширению Вселенной для объяснения ослабления блеска далёких СН Ia.
- Полученные параметры кривой блеска и физические характеристики СН 2009nr могут использоваться другими авторами для исследования зависимости «абсолютная звёздная величина–форма кривой блеска». СН 2009nr интересна тем, что взорвалась практически в межгалактическом пространстве, следовательно, полученные данные (в частности по поглощению) могут быть использованы для анализа межзвёздной среды вокруг сверхновой и изучения подобных сверхновых на основании более широкой выборки.
- Была проведена калибровка поляроидов роботизированной сети МАСТЕР в Кисловодске, Тунке и Благовещенске. Полученные в результате данные о степени поляризации и поляризационном угле для четырёх блазаров могут быть полезны для групп, занимающихся мониторингом подобных объектов.
- Посчитана ожидаемая частота слияний нейтронных звёзд для горизонта детектирования будущих версий проекта LIGO<sup>1</sup> [26].

## Положения, выносимые на защиту

1. Проведено сравнение результатов Машины Сценариев с наблюдательными данными по эволюции темпа сверхновых типа Ia. Подтверждена гипотеза, что преобладающим механизмом взрыва СН Ia в эллиптических галактиках является слияние двух белых карликов [27].

---

<sup>1</sup>Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory.

2. Предложен подкласс «чистых» сверхновых, который не подвержен серому поглощению, химической эволюции и возможному различию в механизмах взрыва. Показано, что «чистые» сверхновые подтверждают ускоренное расширение Вселенной [28].
3. Исследованы поляризационные возможности роботизированной сети МАСТЕР. Проведены поляризационные измерения SN Ia 2012bh на ранней стадии расширения оболочки и раннего оптического излучения длинного гамма-всплеска GRB 121011A [19].
4. Показано, что современные сценарии эволюции двойных нейтронных звёзд не противоречат наблюдаемой частоте быстрых радиовспышек [29].

## Публикации

Результаты работы изложены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. Lipunov V.M., Pruzhinskaya M.V., «Scenario Machine: Fast Radio Bursts, Short GRB, Dark Energy and LIGO silence», accepted in **MNRAS** (2014).
2. Pruzhinskaya M.V., Krushinsky V.V., Lipunova G.V., et al. «Optical polarization observations with the MASTER robotic net», **New Astronomy**, 29, p. 65 (2014).
3. Lipunov V.M., Panchenko I.E., Pruzhinskaya M.V., «The mechanism of Supernova Ia explosion in elliptical galaxies», **New Astronomy**, 16, p. 250 (2011).
4. Пружинская М.В., Горбовской Е.С., Липунов В.М., «Чистые» сверхновые и ускоренное расширение Вселенной», **Письма в Астрономический журнал**, том 37, №9, стр. 1 (2011).
5. Цветков Д.Ю., Балануца П.В., Липунов В.М., Волков И.М., Тучин О.А., Куделина И.П., Пружинская М.В., и др. «Фотометрические наблюдения сверхновой 2009nr», **Письма в Астрономический журнал**, том 37, №11, стр. 837 (2011).

6. Горбовской Е.С., Липунов В.М., Корнилов В.Г.,..., Пружинская М.В., и др. «Сеть роботизированных оптических телескопов МАСТЕР-II. Первые результаты», **Астрономический журнал**, том 90, №4, с. 267 (2013).

Кроме того, автор диссертации является соавтором 10 электронных публикаций в циркулярах GCN (The Gamma-ray Coordinates Network, [http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3\\_archive.html/](http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html/)) и Atel (The Astronomers Telegram <http://www.astronomerstelegam.org/>) и имеет четыре публикации в трудах конференций.

### **Апробация работы**

Результаты работы были доложены на следующих российских и международных конференциях:

1. 281 IAU симпозиум «Binary Paths to type Ia Supernovae explosions» (Падуя, Италия, 2011): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».
2. Международная конференция «50 лет космической эре: реальные и виртуальные исследования неба» (Ереван, Армения, 2011): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».
3. Конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, ИКИ РАН, 2011): устный доклад «Чистые сверхновые и ускоренное расширение Вселенной».
4. XVIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, МГУ, 2011): устный доклад «Чистые сверхновые и тёмная энергия».
5. Международная школа по астрофизике (Терамо, Италия, 2012): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».
6. Международная конференция «Глобальная роботизированная сеть МАСТЕР» (Москва, ГАИШ МГУ, 2012): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».

7. Конференции «Молодые учёные России» (Москва, 2013): стендовый доклад «Сверхновые звёзды Ia».
8. Вторая международная конференция лаборатории экстремальной Вселенной «Gamma Ray Bursts, New Missions to New Science» (Москва, НИИЯФ МГУ, 2014): устный доклад «Polarization observations with the MASTER Global Robotic Net».
9. Научная сессии НИЯУ МИФИ (Москва, МИФИ, 2014): устный доклад «Космологические радиовспышки и слияния нейтронных звёзд».
10. Научная конференция «Физика Космоса» (Екатеринбург, Коуровская обсерватория, 2014): устный доклад «Поляризационные наблюдения с помощью роботизированной Глобальной сети МАСТЕР».

Результаты, представленные в диссертации, также докладывались и обсуждались на Общественном семинаре астрофизиков имени Я.Б. Зельдовича (Москва, ГАИШ МГУ, 2011–2013 года).

### **Личный вклад автора**

Автором совместно с его научным руководителем был предложен подкласс «чистых» сверхновых звёзд типа Ia, свободных от поглощения серой пылью, различий в химической эволюции и механизмах взрыва. Автором был самостоятельно произведён отбор кандидатов в «чистые» сверхновые с последующим построением диаграммы Хаббла и определением вклада тёмной энергии в общую плотность Вселенной. В работе, посвящённой сверхновой SN 2009nr, автору принадлежит обработка кривых блеска сверхновой в пакете программ SNooPy [30] и определение её основных физических параметров, таких как абсолютная звёздная величина в нескольких спектральных диапазонах и поглощение в родительской галактике. Используя результаты популяционного синтеза и последние наблюдательные данные по частоте СН Ia в эллиптических галактиках [31, 32], диссертантом совместно с соавторами было показано, что до 99% сверхновых Ia в эллиптических галактиках — результат слияния белых карликов. Автор продемонстрировал, что изменение частоты вспышек сверхновых в механизме сливающихся белых

карликов не зависит от закона сближения, а определяется начальным распределением по полуосям. Для калибровки поляроидов роботизированной сети МАСТЕР в Кисловодске, Тунке и Благовещенске автором самостоятельно был произведён отбор и наблюдение ярких сильнополяризованных блазаров в момент их активности. Совместно с В.В. Крушинским (УрФУ) и Г.В. Липуновой (ГАИШ МГУ) проведены фотометрия и поляриметрия блазаров, сверхновой и гамма-всплесков. Совместно с научным руководителем было показано, что причиной быстрых радиовспышек могут быть слияния нейтронных звёзд. Используя результаты Машины Сценариев с учётом современных данных о скорости звёздообразования во Вселенной, автором была посчитана частота слияний нейтронных звёзд в единице сопутствующего объёма и интегральная частота слияний для красных смещений до  $z = 1$ . Совместно с научным руководителем было показано, что нет никаких противоречий между частотой слияния нейтронных звёзд и количеством быстрых радиовспышек, а отсутствие положительных детектирований в LIGO от слияния двух нейтронных звёзд согласуется с нашими астрономическими предсказаниями, хотя слияния нейтронных звёзд с чёрными дырами уже могли бы быть зарегистрированы.

## **Структура и обзор диссертации**

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей три главы, и заключения, а также двух приложений. В диссертации 149 страниц, включая 25 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 337 ссылок.

Во **введении** описана важность катастрофических взрывов (сверхновых звёзд и гамма-всплесков) для изучения свойств Вселенной на космологических масштабах и их влияние на химическую эволюцию и звёздообразование в галактиках. Обсуждаются актуальность диссертационной работы, её цель и новизна, практическая значимость. Также формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации, описывается личный вклад автора в проделанную работу.

**Первая глава** посвящена сверхновым звёздам типа Ia и вопросам, связанным с их использованием в качестве индикаторов расстояний во Вселенной. В первом разделе главы обсуждается важность СН Ia в наблюдательной космологии. Следующий раздел посвящён истории «стандартизации» СН Ia и современным методам определения их основных физических параметров по форме кривых блеска. В частности, описан пакет программ SNooPy, с помощью которого была проведена «стандартизация» СН 2009nr. Полученные в результате физические параметры СН 2009nr позволили использовать её при дальнейших исследованиях, включив сверхновую в выборку «чистых» сверхновых. Поскольку для задач наблюдательной космологии важны далёкие сверхновые, то в этом разделе также обсуждаются вопросы, связанные с поглощением света и искажением спектра (*K*-поправка) на больших красных смещениях.

Одной из проблем гипотезы стандартной свечи является возможное различие в механизмах взрыва СН Ia. В следующем разделе первой главы показано, что основным механизмом, отвечающим за взрыв СН Ia в эллиптических галактиках, является слияние двух белых карликов. Приводится дополнительный аргумент в пользу модели сливающихся белых карликов, связанный с соответствием между предсказываемым и наблюдаемым законом уменьшения частоты взрывов СН Ia в эллиптической галактике.

В заключительном разделе главы рассматривается вопрос о нарушении стандартности блеска СН Ia из-за поглощения излучения серой пылью в родительских галактиках. Серое поглощение может приводить к такому же видимому эффекту ослабления блеска далёких сверхновых, как и ускоренное расширение Вселенной. Для исключения влияния серого поглощения вводится подкласс «чистых» сверхновых. Эти сверхновые взорвались далеко от центра родительских спиральных галактик или в эллиптических галактиках, где поглощение, в том числе и серое, мало. Анализ диаграмм Хаббла для «чистых» сверхновых показывает ускоренное расширение Вселенной. В разделе также ставятся ограничения на механизм взрыва «чистых» сверхновых и химический состав звёзд-прародителей. Низкая дисперсия «чистых» СН Ia на диаграмме Хаббла показывает, что предложенный подкласс может быть эффектив-

ным инструментом для исследования свойств ускоренного расширения Вселенной.

Во **второй главе** автор докладывает результаты исследования поляризационной точности сети телескопов-роботов МАСТЕР и анализирует способности сети МАСТЕР измерять поляризацию различных типов астрофизических объектов: гамма-всплесков, сверхновых звёзд, блазаров. Первые два раздела главы посвящены описанию сети МАСТЕР и процессу обработки поляризационных наблюдений. Далее приводятся результаты поляризационных наблюдений блазаров, два из которых — OC 457, 3C 454.3 — регистрировались в момент их активности и показали высокую степень поляризации. В конце раздела приводятся наблюдения SN 2012bh и гамма-всплеска GRB 121011A, обсуждается роль поляризационных измерений в изучении катастрофических взрывов во Вселенной.

В **третьей главе** обсуждаются быстрые радиовспышки в модели сливающихся нейтронных звёзд или нейтронной звезды и чёрной дыры. Показано, что нет никаких противоречий между частотой слияния нейтронных звёзд и наблюдаемой частотой быстрых радиовспышек с точки зрения популяционного синтеза двойных звёзд. На основании результатов Машины Сценариев также рассматривается вопрос об отсутствии положительных детектирований в проекте по поиску гравитационных волн LIGO.

**Заключение** посвящено перечислению основных результатов диссертации и обсуждению перспектив дальнейших исследований.

В **приложении А** приводится список сверхновых звёзд, открытых или впервые снятых с помощью роботизированной сети МАСТЕР. **Приложение В** содержит абсолютные калибровки МАСТЕР в поляроидах и *BVRI* фильтрах.

# 1 Сверхновые звёзды типа Ia

## 1.1 Индикаторы расстояний во Вселенной

В 1915 году Альберт Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности (ОТО). Несколько позднее он модифицировал уравнения ОТО, добавив в них постоянную величину, получившую впоследствии название космологической постоянной. По-видимому, Эйнштейна привлекала идея вечной и статической Вселенной, поэтому с помощью космологической постоянной он фактически ввёл антитяготение, которое скомпенсировало Ньютонское тяготение. Однако Вселенная Эйнштейна оказалась неустойчива. На смену статической Вселенной Эйнштейна пришла модель расширяющейся Вселенной Фридмана. Космологическая константа содержалась в модели Фридмана в качестве параметра, подлежащего измерению. Измерить космологическую константу можно с помощью зависимости фотометрического расстояния от красного смещения для термоядерных сверхновых типа Ia (диаграмма Хаббла). Подобные измерения стали возможны с развитием наблюдательных инструментов и появлением крупных обзоров по поиску сверхновых звёзд. Однако с момента введения Эйнштейном в уравнения ОТО космологической постоянной к моменту обнаружения ускоренного расширения Вселенной история изучения сверхновых звёзд насчитывала уже почти 80 лет.

Началось всё в 1920 году, когда после дебатов Харлоу Шэпли и Хэбера Д. Кёртиса определение светимостей сверхновых, тогда ещё не выделенных в отдельный класс, стало центральной проблемой шкалы расстояний во Вселенной [33]. Кёртис поддерживал гипотезу «Островной Вселенной», которая состоит в том, что наблюдаемые на небе «спирали» являются другими галактиками, подобными нашей. Шэпли выступал против этой гипотезы. Основным аргументом Шэпли состоял в том, что в случае «Островной Вселенной» абсолютные величины некоторых новых звёзд достигли бы значений  $M = -16^m$ , о чём, как считалось, не может быть и речи. Кёртис, в свою очередь, основывался на том, что, принимая «спирали» составляющей частью нашей галактики, придётся вводить два класса новых звёзд, поскольку в «спиралях» они оказыва-

лись в среднем на 7 звёздных величин слабее остальных новых<sup>1</sup>. Идея существования такой двойственности при всех остальных одинаковых характеристиках казалась ему неправдоподобной. Для того, чтобы добиться совпадения в абсолютном блеске, необходимо было отнести «спирали» на гораздо большие расстояния. Примечательно, что в этом случае, как заметил Кёртис, абсолютные размеры «спиралей» совпадали в размерах нашей галактики.

Разделение между новыми и сверхновыми звёздами произошло в 1934 году [1], когда окончательно была установлена внегалактическая природа «спиралей». Уолтер Бааде и Фриц Цвикки показали, что кроме огромной разницы в блеске, часть новых звёзд сильно отличается спектрально и фотометрически. Тогда же для этих звёзд ими был предложен термин «сверхновые». В 1938 году Бааде обратил внимание, что сверхновые — более однородный класс звёзд, чем новые. Найденная им дисперсия в максимуме для 18 сверхновых составила  $\sim 1.1^m$ , благодаря чему сверхновые стали считаться хорошими индикаторами расстояний во Вселенной [34]. Однако Бааде повезло, поскольку в его выборку не попали сверхновые II типа, имеющие в среднем меньшую светимость. Только в 1940 году Минковский, получив и проанализировав спектр сверхновой 1940В, разделил сверхновые на два основных типа по характеру спектров [2]. К типу I он отнёс те сверхновые, в спектрах которых отсутствовал водород, и весь спектр состоял из широких минимумов и максимумов, не поддававшихся объяснению<sup>2</sup>. Ко II типу были отнесены сверхновые, спектры которых показали некоторое сходство с обычными новыми звёздами присутствием очень интенсивных эмиссионных линий водорода. Позднее появилась более детальная классификация. Оказалось, что I тип сверхновых далеко не так однороден. Для большинства СН I линия поглощения однократно ионизованного кремния на длине волны около  $6100\text{\AA}$  была самой заметной деталью в спектре, однако для некоторых сверхновых она практически отсутствовала, а наиболее интенсивными были линии поглощения гелия. Эти сверхновые получили обозначение Ib, а «классические» сверхновые I типа стали обозначать Ia. В дальнейшем оказалось, что у некоторых сверхновых Ib отсутствуют и линии гелия, их обозна-

---

<sup>1</sup>Здесь не идёт речь о сверхновых звёздах. Имелось в виду 2 класса среди обычных новых звёзд.

<sup>2</sup>Спектры СН I были позднее расшифрованы Ю.П. Псковским [3].

чили как Ic. Только после разделения сверхновых на типы и подтипы оставшийся наиболее однородным тип SN Ia стал использоваться в качестве индикатора астрономических расстояний (Рис. 1.1).



Рис. 1.1: Классификация сверхновых звёзд.

В 1998–1999 годах две международные группы астрономов, одной из которых руководили Брайан Шмидт и Адам Рис, а другой — Сол Перлмуттер, сообщили, что космологическое расширение происходит с ускорением. Проект «Supernova Cosmology Project» начался в 1988 году под руководством Сола Перлмуттера. Целью проекта было определение космологических параметров Вселенной с помощью зависимости «модуль расстояния–красное смещение» для далёких SN Ia. Первые результаты, полученные по 7 сверхновым на  $z \sim 0.4$ , дали нулевое значение космологической постоянной [35]. Однако более детальный анализ, включающий в себя уже 42 космологические сверхновые с красными смещениями от 0.18 до 0.83, показал, что в случае плоской Вселенной ( $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ ) плотность материи  $\Omega_M = 0.28_{-0.08}^{+0.09}$  ( $1\text{-}\sigma$  статистическая ошибка)  $_{-0.04}^{+0.05}$  (систематическая ошибка). Вероятность того, что

плотность тёмной энергии  $\Omega_\Lambda$  не равна нулю, составила 99.8% [5]. Конкурирующий проект Брайана Шмидта «High-Z Supernova Search Team» стартовал в 1995 году [36]. Их первые попытки обнаружить ускоренное расширение также не увенчались успехом из-за больших ошибок в измерениях [37]. Только в 1998 году, используя расширенную выборку из 16 далёких сверхновых, им удалось показать, что в случае плоской Вселенной  $\Omega_M = 0.28 \pm 0.1$  [4]. Примечательно, что все далёкие сверхновые в обоих проектах были открыты на межамериканской обсерватории Серро-Тололо с помощью 4-х метрового телескопа Бланко, а близкие сверхновые с  $z < 0.1 - 0.15$  были взяты из Калан/Тололо обзора сверхновых звёзд [38]. В 2011 году за открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения далёких сверхновых Солу Перлмуттеру, Брайану Шмидту и Адаму Рису была присуждена Нобелевская премия.

## 1.2 «Стандартизация» свечи

Кривые блеска сверхновых типа Ia существенно отличаются от кривых блеска сверхновых других типов. Приблизительно за 15 суток яркость звезды увеличивается более чем на  $17^m$  и плавно достигает максимума. В максимуме блеска СН Ia пребывает несколько суток и имеет в среднем абсолютную звёздную величину в  $B$  фильтре  $\sim -19.5^m$ . В этот период звезда излучает около  $4 \times 10^{43}$  эрг/с, что в 10 миллиардов раз превосходит светимость Солнца. После достижения максимума блеск СН Ia быстро спадает — на  $2^m - 3^m$  за 20–30 суток. А затем увеличение видимой звёздной величины следует почти линейному закону в течение длительного времени (порядка сотен дней) до тех пор, пока вспыхнувшая звезда не перестанет быть наблюдаемой. Согласно Бааде, начиная с момента спустя 100 дней после максимума, звёздная величина у СН Ia возрастает на  $0.0137^m$  в день. Продолжительность наблюдений отдельных СН Ia может достигать примерно 350 суток. За все время вспышки она излучает около  $10^{50} - 10^{51}$  эрг. После максимума сверхновые непрерывно «краснеют», то есть основная часть излучения сдвигается в сторону более длинных волн. Это покраснение прекращается на стадии линейного падения блеска и может даже смениться «поголубением» сверхновых. Кривые блеска СН Ia в красном и инфракрасных лучах (по-

лосы  $R, I, J, H, K$ ) сильно отличаются от кривых блеска в полосах  $B$  и  $V$ : если в  $R$  фильтре заметно «плечо» через 20 дней после максимума, то в фильтре  $I$  и более длинноволновых диапазонах появляется настоящий второй максимум.

Следует подчеркнуть удивительное сходство кривых блеска после максимума у различных сверхновых типа Ia. Они оказались универсальными, что и позволило в своё время считать их «стандартными свечами». Вместе с тем не надо забывать, что, несмотря на кажущееся сходство, кривые блеска всё-таки отличаются между собой, и дисперсия модуля расстояний на диаграммах Хаббла для разных выборок СН Ia составляет  $\sigma = 0.36^m - 0.65^m$  [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46]. В действительности всё оказалось ещё сложнее. Были обнаружены сверхновые, характеризующиеся красным цветом в максимуме блеска, пониженной светимостью, отсутствием второго максимума на кривых блеска в длинноволновых диапазонах и некоторыми спектральными особенностями. Первой такой сверхновой была СН 1991bg с быстрым падением блеска после максимума. Падение блеска составило  $2.05^m$  и  $1.42^m$  в  $B$  и  $V$  фильтрах за 15 дней после максимума, тогда как для стандартных моделей СН Ia оно составляет  $1.22^m$  и  $0.64^m$  соответственно [47, 48]. СН 1991bg оказалась в среднем на 2 звёздных величины слабее, чем остальные СН Ia в скоплении Девы, которому принадлежит родительская галактика сверхновой NGC 4374. Объекты, подобные СН 1991bg, называются «сверхновыми типа 1991bg». Ещё одна разновидность СН Ia, наоборот, отличается повышенной светимостью в максимуме. Для неё характерны медленное спадание блеска после максимума и меньшие интенсивности линий поглощения в спектрах. Прототипом для это класса сверхновых является СН 1991T. Наиболее малочисленный класс составляют пекулярные сверхновые Iaх, имеющие абсолютные звёздные величины в диапазоне  $-14.2^m \geq M_{V,peak} \geq -18.9^m$  при тех же формах кривых блеска, что и у обычных СН Ia. Кроме того, в спектрах СН Iaх присутствует гелий, что накладывает ограничения на возможные модели взрыва этого типа сверхновых [49].

На диаграмме 1.2 представлен вклад основных подтипов СН Ia в общее их число в объёме до  $z = 0.08$ . Такой выбор объёма связан с тем, что только для близких сверхновых имеются хорошие спектральные дан-

ные, и эффекты селекции сказываются не так сильно. Однако и в данном случае полностью их исключить нельзя. Например, сверхновых типа Iaх из-за их слабости найдено всего три десятка, в то время как ожидается, что на каждые 100 СН Ia приходится  $31_{-13}^{+17}$  СН Iaх [49].

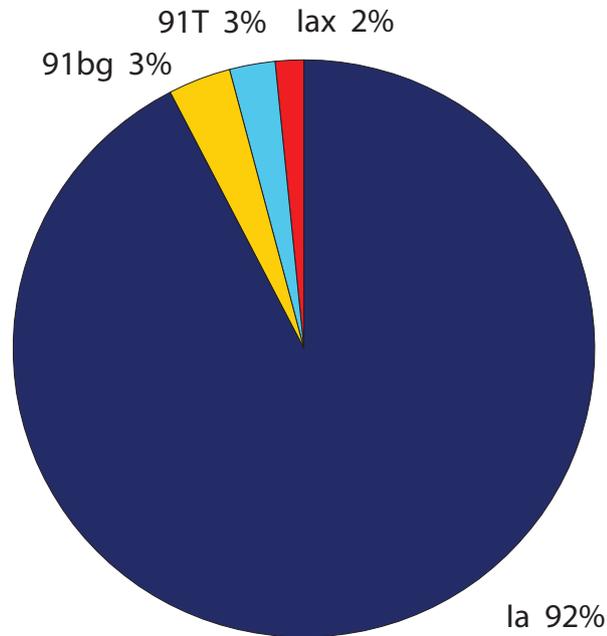


Рис. 1.2: Вклад основных подтипов СН Ia в общее их число в объёме до  $z = 0.08$ . Для построения диаграммы использовались данные из каталога сверхновых звёзд ГАИШ [50] и из работы [49].

Таким образом, массовые наблюдения СН Ia поставили под вопрос универсальность их кривых блеска, и гипотеза «стандартной свечи» была разрушена. Но, оказывается, существует зависимость между параметрами кривой блеска и физическими характеристиками сверхновой, в том числе и её абсолютной звёздной величиной в максимуме блеска. Сверхновые звёзды Ia оказались «стандартизуемыми» объектами.

Всё началось в 40-х годах прошлого столетия, когда для характеристики кривых блеска новых звёзд Мак Лафлин ввёл величину  $t_3$  — время в сутках, за которое блеск звёзды падает на  $3^m$  после максимума, и первым обнаружил связь между  $t_3$  и абсолютной звёздной величиной новой в максимуме ( $M_{max}$ ): чем больше  $M_{max}$ , тем быстрее падает блеск

новой после максимума [51]<sup>1</sup>. Чтобы показать, что новые и сверхновые звёзды — это два независимых класса звёзд, Иван Михеевич Копылов стал строить подобные зависимости для сверхновых звёзд [53, 54]. При построении зависимости между  $M_{max}$  и скоростью падения блеска после максимума Копылов пользовался все той же величиной  $t_3$ . Однако Копылов не разделял сверхновые по типам, вследствие чего зависимость получилась отличающейся по наклону от аналогичной зависимости для новых звёзд, но с той же тенденцией: чем больше величина  $t_3$ , тем меньше светимость сверхновой в максимуме.

Впервые подобные зависимости для разных типов сверхновых стал строить советский астроном Юрий Павлович Псковский в 1967 году. В качестве основного параметра, характеризующего форму кривой блеска, Псковский использовал величину  $\beta$  — наклон кривой блеска в синих лучах между точкой максимума и точкой изменения скорости падения блеска, выраженный в звёздных величинах и отнесённый к 100-суточному интервалу [55]. Под точкой изменения скорости падения блеска подразумевается момент, когда активное спадание блеска сменяется более медленным, это происходит примерно через 25–30 дней после максимума. Однако, во-первых, строя эти зависимости, он, как и Копылов, стремился подчеркнуть отличие новых звёзд от сверхновых. А во-вторых, при анализе зависимости для сверхновых I типа<sup>2</sup> (СН I) Псковский показал, что большинство из них имеет схожие значения наклона  $\beta$ , то есть их кривые блеска по-прежнему можно считать идентичными, а сами СН I пригодными в качестве индикаторов расстояний.

В 1973 году Р. Барбон и др. публикуют работу, в которой они выделяют два подкласса СН I по скорости падения блеска: «быстрые» и «медленные» [56]. «Быстрые» СН I в максимуме оказываются слабее «медленных». Кроме того, Барбон и др. пришли к выводу, что существование двух подклассов СН I физически обосновано, поскольку наблюдается связь между подклассом СН I и типом галактики, в которой она взорвалась: «быстрые» СН I «избегают» эллиптических галактик, а «медленные» — неправильных (ср. с [38]). На существование двух групп сверхновых I типа, связанных с различными звёздными популяциями (типами

<sup>1</sup>Верно до сих пор для быстрых новых звёзд с  $t_3 < 50$  [52].

<sup>2</sup>Разделение на подтипы Ia, Ib, Ic появилось позднее.

галактик) указывалось и ранее (см. [57] и Dallaporta, 1972 в [56]). Дальнейшие исследования Барбона и др. показали, что никакой значительной разницы между «быстрыми» и «медленными» СН I не наблюдается [58].

В 1977 году Псковский опубликовал статью, в которой предложил ввести фотометрическую классификацию сверхновых, основывающуюся на величине  $\beta$ : сверхновые с большими значениями  $\beta$  было предложено называть старшими, а с маленькими значениями  $\beta$  — младшими [59]. Фотометрические классы записывались следующим образом: тип сверхновой и значение  $\beta$  через точку после типа. Например, фотометрический класс I.10 означал, что сверхновая принадлежит к I типу с  $\beta = 10$ . В этой же статье Псковский привёл зависимость, связывающую абсолютную звёздную величину в максимуме СН I с параметром  $\beta$ . Зависимость была установлена по 32 сверхновым I типа:

$$-21.3 + 0.11\beta = M_{pg} \pm 0.5, \quad (1.1)$$

где  $M_{pg}$  — фотографическая звёздная величина [59]. Таким образом, Псковский первым пришёл к правильному заключению, что сверхновые с медленным падением блеска оказываются ярче сверхновых с резким падением блеска. Однако стоит отметить, что независимо от Псковского правильную зависимость между наклоном кривой блеска и абсолютной светимостью в максимуме получил (и сделал правильные выводы из этого!) Берт Вударт Раст в 1974 году [60] (см. также [61]). Диссертация Раста появилась на 3 года раньше, чем статья Псковского. С уверенностью сказать, знал Псковский о работе Раста или нет, нельзя. Никаких публикаций у Раста на эту тему в астрономических журналах не было, только публикации в бюллетене американского астрономического общества [62].

Дэвид Бранч в своей статье [63] рассмотрел вопрос о классификации СН I по фотометрическим классам и пришёл к выводу о том, что СН I распределены по параметрам кривой блеска непрерывным образом, а не образуют два подкласса объектов, как утверждал Барбон [56]. Кроме того, Бранч подтвердил вывод Псковского о том, что значение абсолютной звёздной величины в максимуме коррелирует со скоростью падения блеска после максимума. Однако последующий анализ уже СН Ia, про-

ведённый Дугласом Л. Миллером и Дэвидом Бранчем, не выявил этой зависимости [41].

Джон Р. Буассо и Дж. Крэг Уилер, опираясь на работу [41], исследовали вопрос о том, как фоновый свет от родительских галактик СН Ia может влиять на наблюдаемые изменения абсолютной звёздной величины в максимуме и на скорость падения блеска  $\beta$  [64]. Добавив к фотометрическим данным небольшое количество фона от родительской галактики, они получили одновременно и увеличение пиковой светимости, и «уплощение» кривой блеска, то есть эффект Псковского. Учёт фона делает кривую блеска более крутой и сдвигает точку изменения наклона падения блеска. Они показали, что вклад от фона становится более значимым для слабых объектов. Таким образом, правильный учёт фона особенно важен при изучении далёких СН Ia, свет от которых содержит в себе большую долю фона от родительской галактики. Буассо и Уилер пришли к выводу о том, что наблюдаемая дисперсия  $\beta$  случайна, и большинство СН Ia имеют схожие кривые блеска.

В начале 80-х годов появились ПЗС-камеры. Первые кривые блеска СН Ia, полученные методами ПЗС-фотометрии, показали, что блеск некоторых сверхновых после максимума спадает быстрее. Позднее была обнаружена СН Ia 1991bg низкой светимости с быстрым падением блеска. Это мотивировало Марка Филлипса пересмотреть зависимость, полученную Псковским, используя 9 СН Ia с хорошо известными расстояниями, найденными с помощью зависимости Талли-Фишера или методом флуктуации поверхностной яркости для галактик. Поскольку точку изменения наклона падения блеска для СН Ia сложно определить с хорошей точностью [65], в качестве альтернативы параметру  $\beta$  Филлипс использует  $\Delta m_{15}$  — параметр, который показывает, на сколько звёздных величин падает блеск за первые 15 дней после максимума (в голубом свете). Параметр  $\Delta m_{15}$  был предложен Жоржем Джакоби, как отмечает сам Филлипс в благодарностях к своей статье [66]. Соотношения между максимальной абсолютной звёздной величиной в  $B$ ,  $V$ ,  $I$  фильтрах и

$\Delta m_{15}$ , полученные Филлипсом [66]:

$$\begin{aligned} M_{B_{max}} &= -21.726(0.498) + 2.698(0.359) \times \Delta m_{15}(B) \\ M_{V_{max}} &= -20.883(0.417) + 1.949(0.292) \times \Delta m_{15}(B) \\ M_{I_{max}} &= -19.591(0.415) + 1.076(0.273) \times \Delta m_{15}(B). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Использование  $\Delta m_{15}$  привело к уменьшению дисперсии  $M_{max}$  в  $B, V, I$  фильтрах с  $0.8^m, 0.6^m, 0.5^m$  до  $0.36^m, 0.28^m, 0.38^m$  соответственно [66]. Существует также квадратичная зависимость абсолютной звёздной величины в максимуме от параметра наклона  $\Delta m_{15}$  [67].

Роберт Трипп предложил двухпараметрическую модель, в которой абсолютная звёздная величина в максимуме зависит не только от  $\Delta m_{15}(B)$ , но и от показателя цвета сверхновой ( $B - V$ ) [68]. Однако в модели не разделяется вклад в покраснение СН Ia за счёт поглощения в родительской галактике и за счёт её внутренних механизмов. Некоторые теоретические модели взрыва СН Ia предсказывают зависимость абсолютной звёздной величины сверхновой как от  $\Delta m_{15}(B)$ , так и от показателя цвета ( $B - V$ ) [69].

**$\Delta m_{15}(B)$**  Дальнейшее развитие метод получил в работе [70], где в качестве опорной выборки использовались  $B, V, I$  кривые блеска 7 СН Ia с хорошо известными значениями абсолютных звёздных величин в максимуме и  $\Delta m_{15}(B)$ . Сверхновые выбирались таким образом, чтобы охватить широкий диапазон значений  $\Delta m_{15}(B)$  от  $0.87^m$  до  $1.93^m$ . Применение метода позволило сократить дисперсию до  $0.13^m$  ( $I$  фильтр) –  $0.17^m$  ( $B$  фильтр) [38]. Филлипс улучшил метод, введя в рассмотрение учёт покраснения от родительской галактики сверхновой [67]. Л.М. Германи добавил в метод  $R$  фильтр, новые кривые блеска близких сверхновых и пересчитал значения  $K$ -поправок [71]. Преимущество метода  $\Delta m_{15}(B)$  в его простоте и в том, что для вывода зависимостей в качестве опорной выборки использовались кривые блеска реальных сверхновых; основной недостаток — маленький размер опорной выборки, что усложняет процедуру анализа ошибок.

**MLCS** Адам Г. Рисс, Уильям Х. Пресс и Роберт П. Кишнер разработали Light Curve Shape (LCS) метод, позволяющий находить светимость СН Ia по её визуальной кривой блеска [72]. Для получения се-

мейства различных кривых блеска СН Ia к эталонной кривой блеска [73] прибавляется/вычитается корректирующая поправка  $\Delta$ . Используя простое линейное соотношение между  $\Delta$  и абсолютной звёздной величиной СН Ia, удалось уменьшить дисперсию модуля расстояния на диаграмме Хаббла с  $0.5^m$  до  $0.21^m$  в фильтре  $V$ . Позднее LCS метод был усовершенствован: анализироваться стали также кривые показателей цвета  $(B - V)$ ,  $(V - R)$  и  $(V - I)$ . Метод стал называться Multicolor Light Curve Shape (MLCS) [74]. Применение MLCS метода позволило определить, какой вклад в ослабление блеска СН Ia вносят различные факторы: удалённость от наблюдателя, поглощение пылью и вариации собственной светимости сверхновых. Включение в метод фильтра  $U$  уменьшило  $\sigma_V$  до  $0.18^m$ , что соответствует  $\sim 8\%$  точности в определении расстояний [75]. Недостаток метода в том, что в нём используются некие априорные предположения о покраснении, вносимом родительскими галактиками, и о законе покраснения, хотя как он выглядит на самом деле для других галактик, в особенности на больших красных смещениях, неизвестно.

**Stretch** Ещё один метод «стандартизации» СН Ia был предложен Солом Перлмуттером в 1997 году [35]. Он позволяет унифицировать кривые блеска в  $B, V$  фильтрах одним параметром,  $s$ -фактором (stretch-factor<sup>1</sup>), в течение периода: 10 дней до максимума и 4 недели после. Введение  $s$ -фактора позволяет привести исследуемую кривую блеска к некой эталонной (средней) кривой блеска путём растяжения или сжатия временной оси. Получение эталонной кривой описано в работах [73, 76]. Главный недостаток метода в том, что он не работает для кривых блеска в  $R, I$  фильтрах из-за наличия в них второго максимума на кривых блеска<sup>2</sup>. Кроме того, метод не позволяет определять покраснение в родительской галактике сверхновой. Связь между  $\Delta m_{15}(B)$  и  $s$ -фактором в  $B$  фильтре:  $\Delta m_{15}(B) = (-2.04 \pm 0.11)s_B + (3.06 \pm 0.10)$  [78].

**PRES** Метод был разработан Джозе Льюисом Прието, Армином Рэстом и Николасом Б. Сантсеффом [79]. Метод объединяет в себе преимущества методов  $\Delta m_{15}(B)$  и MLCS: использование в качестве опорной выборки реальных кривых блеска СН Ia с разными значениями  $\Delta m_{15}(B)$  и

<sup>1</sup>Stretch в переводе с английского значит «растяжение»

<sup>2</sup>Модифицированная версия Stretch-метода, использующая только первый максимум в ближнем  $IR$  диапазоне, представлена в работе [77].

применение математического аппарата MLCS для оценок ошибок параметров. В основе метода лежит простая математическая модель, с помощью которой из 14 сверхновых с хорошо измеренными  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$  кривыми блеска был получен непрерывный набор модельных кривых блеска, параметризованный одним параметром  $\Delta m_{15}(B)$ . Применение метода позволяет одновременно определить максимум в  $B$ ,  $\Delta m_{15}(B)$ , избыток цвета из-за поглощения света в родительской галактике и модуль расстояния, исправленный за покраснение. Расширенная версия этого метода реализована в программе **SNooPy** [30].

**SALT** Spectral Adaptive Light curve Template for type Ia supernova (SALT) — один из современных методов обработки кривых блеска СН Ia [80]. Метод был развит для анализа большого количества кривых блеска, полученных с помощью современных крупных обзоров в разных фильтрах. В основе метода лежит синтетический спектр СН Ia [81]. После задания такого спектра происходит процесс «фитирования» наблюдательных фотометрических данных, полученных минимум в двух полосах пропускания. В результате определяются наклон кривой блеска, показатель цвета ( $B - V$ ) в максимуме, положение и величина максимума в  $B$  полосе. Если имеются данные только в одной полосе, то показатель цвета приходится фиксировать. Для сверхновых с большим количеством наблюдательных данных SALT даёт хорошие оценки параметров кривой блеска. Но, к сожалению, для «неполных» кривых блеска работает плохо. В методе не разделяется вклад в покраснение, вносимый родительской галактикой, и внутренний цвет сверхновой.

**CMAGIC** Color-Magnitude Intercept Calibration (CMAGIC) — метод, основанный на зависимости «цвет–звёздная величина» для СН Ia. Ли-фан Ванг с коллегами [82] сделали интересное открытие, заключающееся в том, что в течение первого месяца после максимума звёздная величина СН Ia, найденная для некоторого показателя цвета, имеет очень маленькую дисперсию. В течение этого периода соотношение между звёздной величиной в  $B$  и показателями цвета ( $B - V$ ) (или ( $B - R$ ), ( $B - I$ )) практически линейное с постоянным наклоном для разных СН Ia. После применения коррекции дисперсия в звёздных величинах составляет  $0.1^m$ . CMAGIC метод можно использовать для расчёта вклада родительской

галактики в поглощение света от СН Ia. Метод прекрасно подходит для определения расстояний до сверхновых, которые были зарегистрированы после максимума блеска.

Описанные выше методы позволяют определять расстояния до СН Ia, опираясь на зависимость между параметрами, зависящими от расстояния (максимум блеска или средняя разница в звёздных величинах между наблюдаемой кривой блеска и эталонной кривой блеска) и параметрами, не зависящими от расстояния (показатель цвета, s-фактор или  $\Delta m_{15}(B)$ ).

Существование эмпирических соотношений между светимостью, формой кривой блеска и цветом СН Ia объясняется в некоторых теоретических моделях. Общепринято, что к феномену СН Ia приводит взрыв углеродно-кислородного белого карлика (БК) с массой, близкой к Чандрасекаровской [83, 84, 85]. Различные теоретические модели включают в себя дефлаграцию (дозвуковое горение), детонацию (сверхзвуковое горение), нецентральную детонацию, отложенную детонацию, пульсационную отложенную детонацию [86, 87, 88, 89, 90, 69, 91]. Также существует модель субчандрасекаровского БК в качестве прародителя СН Ia, где взрыв происходит на поверхности БК из-за поджига накопленного в результате аккреции гелиевого слоя [92, 93, 94, 95, 96]. Одно из возможных объяснений наблюдаемых соотношений в том, что значение плотности, при котором детонационный режим горения сменяется дефлаграционным, влияет на количество образующегося при взрыве  $^{56}\text{Ni}$ . Если смена режимов горения происходит достаточно поздно, то внешняя оболочка успевает расшириться, из-за чего снижается количество образующегося  $^{56}\text{Ni}$ . Это ведёт к уменьшению температуры в расширяющейся оболочке и фотосфере, непрозрачность быстро падает. Следовательно, фотосфера быстрее «просветляется», и высвобожденная энергия высвечивается за короткое время. И наоборот, если детонация достаточно быстро сменяет дефлаграцию, образуется большое количество  $^{56}\text{Ni}$ . В результате мы имеем яркую горячую сверхновую, чья непрозрачная оболочка достаточно медленно теряет энергию, что и объясняет медленный спад светимости на кривых блеска ярких сверхновых.

Теоретические модели взрыва СН Ia дают частичное объяснение неоднородности сверхновых и происхождение эмпирической зависимости меж-

ду формой кривой блеска и светимостью СН Ia. Реализуются ли в природе сразу несколько из предложенных теоретических моделей или неоднородность можно объяснить вариациями внутри одной из них — пока неизвестно.

## 1.3 Обработка СН 2009nr в программе SNooPy

### 1.3.1 Описание программы SNooPy

Все методы, перечисленные в пункте 1.2, используются для уменьшения дисперсии абсолютной звёздной величины СН Ia в максимуме блеска. Чем меньше дисперсия, тем точнее определяются космологические параметры  $\Omega_M$  и  $\Omega_\Lambda$ . Использование «чистых» сверхновых Ia позволяет уменьшить дисперсию модуля расстояний на диаграмме Хаббла (подробнее см. пункт 1.5). Одной из таких сверхновых является СН 2009nr [97], открытая глобальной роботизированной сетью МАСТЕР [20, 21, 22, 23]. Перед тем, как нанести СН 2009nr на диаграмму Хаббла, необходимо её стандартизовать, то есть определить истинное значение абсолютной звёздной величины в максимуме блеска.

В последние годы было разработано несколько методов и программ для определения параметров кривых блеска СН Ia (см. пункт 1.2, а также [98, 99, 30]). В данной работе наблюдения СН 2009nr обрабатывались в программе SNooPy (SuperNovae in Object Oriented Python) [30].

SNooPy — программа, написанная на языке Python, предназначена для обработки кривых блеска сверхновых звёзд. Преимущество программы состоит в том, что она работает с кривыми блеска в стандартной Джонсоновской системе *BVRI* и системе фильтров *uBVgriYJHK*, используемой в проекте Carnegie Supernova Project [100]. SNooPy позволяет оценивать поглощение в нашей галактике на основе карт Шлегеля и др. [101], поглощение в родительских галактиках сверхновых с помощью закона поглощения Карделли и др. [102], рассчитывать *K*-поправки, модуль расстояния, определять момент максимума в различных фильтрах и параметр  $\Delta m_{15}(B)$ .

Для расчёта кривых блеска используется следующая модель:

$$\begin{aligned}
m_X(t - t_{max}) = & T_Y((t' - t_{max})/(1 + z), \Delta m_{15}) + M_Y(\Delta m_{15}) + \\
& + \mu + R_X E(B - V)_{gal} + R_Y E(B - V)_{host} + \\
& + K_{XY}(z, (t' - t_{max})/(1 + z), E(B - V)_{host}, E(B - V)_{gal}),
\end{aligned} \tag{1.3}$$

где  $m_X$  — это видимая звёздная величина в фильтре  $X$ ,  $t_{max}$  — время максимума в фильтре  $B$ ,  $\Delta m_{15}$  — параметр наклона,  $M_Y$  — абсолютная звёздная величина в фильтре  $Y$  в системе отсчёта сверхновой,  $\mu$  — модуль расстояния,  $E(B - V)_{gal}$  и  $E(B - V)_{host}$  — избыток цвета в Галактике и родительской галактике сверхновой,  $R_X$  и  $R_Y$  — отношение полного поглощения к селективному в фильтрах  $X$  и  $Y$ ,  $K_{XY}$  — обобщённая  $K$ -поправка,  $T(t, \Delta m_{15})$  — модельные кривые блеска.

Программа SNooPy основана на методе «стандартизации» кривых блеска, разработанном Прието и др. [79]. В работе [79] была использована опорная выборка из 14 сверхновых с хорошо измеренными кривыми блеска в разных фильтрах и известными значениями  $\Delta m_{15}(B)$ . Поскольку количество кривых блеска «хороших» сверхновых не охватывает весь диапазон значений параметра наклона  $\Delta m_{15}(B)$ , для построения кривых блеска с промежуточными значениями  $\Delta m_{15}$  используется следующий метод. Предположим, что необходимо построить модельную кривую блеска с  $\Delta m_{15} \approx 1.2^m$ . Тогда каждой сверхновой из опорной выборки приписывается некий вес  $w_i$  в зависимости от того, насколько соответствующее ей значение  $\Delta m_{15}$  близко к исходному  $\Delta m_{15} \approx 1.2^m$ . В данном случае вес сверхновой с  $\Delta m_{15} = 1.96^m$  будет меньше, чем вес сверхновой с  $\Delta m_{15} = 1.3^m$ . Значения вычисленных весов нормируются так, чтобы их полная сумма была равна 1. Тогда параметр наклона будет равен следующей сумме:

$$\Delta m_{15} = \sum_{i=1}^n w_i \Delta m_{15}(B)_i. \tag{1.4}$$

А модельная кривая блеска, соответствующая найденному  $\Delta m_{15}$ , будет вычисляться как сумма с весами кривых блеска опорной выборки сверхновых:

$$N^X(\Delta m_{15}) = \sum_{i=1}^n w_i T_i^X, \quad (1.5)$$

где  $T_i^X$  — кривая блеска  $i$ -сверхновой в фильтре  $X$ .

Таким образом, можно получить модельную кривую блеска сверхновой с любым значением параметра наклона. Кроме того, в программе заложена информация о распределении поглощения на луче зрения в нашей галактике. Но анализ кривых блеска далёких сверхновых сталкивается ещё с одной проблемой. Из-за расширения Вселенной спектр сверхновых смещается в красную сторону и растягивается по длине волны. Введение  $K$ -поправки учитывает оба эти эффекта. Для её вычисления необходим набор модельных спектров сверхновых в разные моменты времени в зависимости от параметра наклона. В качестве таких модельных спектров используются спектры, разработанные Питером Нугентом [103] и Эриком Хсиао [104]. Подробнее о  $K$ -поправке см. пункт 1.3.2.

### 1.3.2 $K$ -поправка

В последнее время проводилось и проводится много обзоров по поиску сверхновых звёзд: Nearby Supernova Factory<sup>1</sup>, Carnegie Supernova Project<sup>2</sup> [100], Sloan Digital Sky Survey<sup>3</sup> [105], SuperNova Legacy Survey<sup>4</sup> [106], ESSENCE Supernova Survey<sup>5</sup> [107], CFHT Legacy Survey<sup>6</sup>, Lick Observatory Supernova Search<sup>7</sup> [108], La Silla-QUEST Low Redshift Supernova Survey<sup>8</sup> [109], Mobile Astronomical System of theTElescope-Robots<sup>9</sup> [21], Catalina Real-Time Transient Survey<sup>10</sup> [110], intermediate Palomar Transient Factory<sup>11</sup> [111], GOODS/HST TRANSIENT SEARCH<sup>12</sup> [112]. В связи с этим число открываемых сверхновых, а также количество фотометрических и спектроско-

<sup>1</sup><http://snfactory.lbl.gov/index.html>

<sup>2</sup><http://csp.obs.carnegiescience.edu/>

<sup>3</sup><http://www.sdss.org/>

<sup>4</sup><http://cfht.hawaii.edu/SNLS/>

<sup>5</sup><http://www.ctio.noao.edu/essence/>

<sup>6</sup><http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/>

<sup>7</sup>[http://astro.berkeley.edu/bait/public\\_html/kait.html](http://astro.berkeley.edu/bait/public_html/kait.html)

<sup>8</sup><http://hep.yale.edu/lasillaquest>

<sup>9</sup><http://observ.pereplet.ru/>

<sup>10</sup><http://crts.caltech.edu/>

<sup>11</sup><http://www.ptf.caltech.edu/iptf>

<sup>12</sup><http://www.stsci.edu/ftp/science/goods/>

пических данных для этих объектов всё время растёт. Чем больше наблюдений, тем меньше разброс в определении космологических параметров, и систематические ошибки, вносимые при вычислении  $K$ -поправки, оказывают существенный вклад общую ошибку. Поэтому теперь точное вычисление  $K$ -поправки становится особенно важным.

$K$ -поправка возникает из-за того, что спектр  $F(\lambda)$  испытывает на себе красное смещение, пока излучение идёт от объекта к наблюдателю. Эффект состоит из двух частей. Во-первых, если  $F(\lambda)$  не является плоским, то есть  $F(\lambda_0) \neq F(\lambda_0/(1+z))$ , то излучение, принимаемое на длине волны  $\lambda_0$ , на самом деле было испущено на  $\lambda_z = \lambda_0/(1+z)$ . Следовательно, поток в некой полосе в лабораторной системе — системе, связанной с объектом — будет отличаться от потока, регистрируемого наблюдателем в той же полосе. Во-вторых, ширина полосы пропускания приёмника, регистрирующего поток от объекта, в  $(1+z)$  раз больше, чем ширина этой полосы в лабораторной системе. Первый эффект является функцией длины волны и при  $F(\lambda) = const$  не работает, второй эффект, напротив, не зависит от вида  $F(\lambda)$ . Если поток излучения получен в энергетических единицах, то следующее уравнение определяет значение  $K$ -поправки [113]:

$$K_x = 2.5 \log(1+z) + 2.5 \log \left\{ \frac{\int_0^{\infty} F(\lambda_0) S_x(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F(\lambda_0/(1+z)) S_x(\lambda) d\lambda} \right\}, \quad (1.6)$$

где  $S_x$  — кривая пропускания приёмника в фильтре  $x$ ,  $K_x$  выражено в звёздных величинах.

Стандартная  $K$ -поправка используется для нахождения звёздной величины объекта на красном смещении  $z$  в некотором фильтре  $x$  с помощью формулы [114]:

$$m_x(z, t_{obs}) = M_x(t_{rest}) + \mu(z) + K_x(z, t_{rest}),$$

где  $\mu$  — модуль расстояния (основанный на фотометрическом расстоянии),  $M_x$  — абсолютная звёздная величина в фильтре  $x$ ,  $t_{rest}$  — время в

лабораторной системе отсчёта и  $t_{obs} = (1+z)t_{rest}$  — время в системе отсчёта, связанной с наблюдателем. Стандартной  $K$ -поправкой удобно пользоваться до  $z < 0.2$ , так как на больших красных смещениях требуется значительная экстраполяция спектра сверхновой. Поэтому была введена обобщённая  $K$ -поправка. Именно ей удобно пользоваться при работе со сверхновыми на больших красных смещениях. Обобщённая  $K$ -поправка преобразует звёздную величину в наблюдаемом фильтре  $y$  в звёздную величину в лабораторном фильтре  $x$  [114].

$$K_{xy} = -2.5 \log \left\{ \frac{\int_0^{\infty} Z(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} Z(\lambda) S_y(\lambda) d\lambda} \right\} + 2.5 \log(1+z) + 2.5 \log \left\{ \frac{\int_0^{\infty} F(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F(\lambda/(1+z)) S_y(\lambda) d\lambda} \right\}, \quad (1.7)$$

$$m_y = M_x + \mu + K_{xy}, \quad (1.8)$$

где  $Z$  — модельное распределение энергии по спектру на  $z = 0$ , для которого в используемой фотометрической системе  $U = B = V = R = I = 0$ ,  $F(\lambda)$  — распределение энергии по спектру сверхновой,  $S_x, S_y$  — кривые пропускания приёмника в лабораторном фильтре  $x$  и в фильтре наблюдателя  $y$ ,  $\mu$  — модуль расстояния,  $M_x$  — абсолютная звёздная величина в лабораторном фильтре  $x$ ,  $m_y$  — видимая звёздная величина в фильтре наблюдателя  $y$ . Если  $S_x = S_y$ , то первый член в формуле 1.7 выпадает, и мы получим выражение для стандартной  $K$ -поправки.

Для далёких сверхновых свет, проходящий через некоторый фильтр в системе отсчёта, связанной со сверхновой, испытывает настолько сильное покраснение, что наблюдая в этом же фильтре здесь, на Земле, мы будем терять значительную часть света. Но, подбирая соответствующим образом фильтры, можно добиться практически полного совпадения кривой пропускания фильтра в лабораторной системе отсчёта на некотором  $z$  с фильтром наблюдателя, отнесённого на то же  $z$ .

Применение  $K$ -поправки особенно важно для далёких сверхновых.

### 1.3.3 SN 2009nr

Сверхновая SN 2009nr была открыта на ПЗС-изображении, полученном телескопом роботизированной сети МАСТЕР [21] в Благовещенске 22 декабря 2009 года. Сообщение об открытии было опубликовано 6 января 2010 года [115]. В момент открытия блеск сверхновой составлял около  $13.6^m$ , что сделало её второй по яркости сверхновой, открытой в 2009 году (после SN 2009ig). Координаты SN 2009nr:  $\alpha = 13^h 10^m 58.95^s$ ,  $\delta = +11^\circ 29' 29.3''$  (J2000.0). Сверхновая находилась в  $36''$  к востоку и  $50''$  к северу от центра Scd галактики UGC 8255. Спектр SN 2009nr был получен 7 января 2010 года на 1.5-м телескопе обсерватории Уишл и показал, что объект принадлежит к сверхновым звёздам типа Ia [116]. SN 2009nr была обнаружена на снимках, полученных по программе автоматизированного обзора неба ASAS, что дало возможность проследить кривую блеска в области максимума [117]. Фотометрические ПЗС-наблюдения SN 2009nr осуществлялись на телескопах роботизированной сети МАСТЕР в Кисловодске и Благовещенске. Кривые блеска SN 2009nr в  $U, B, V, R, I$  фильтрах, полученные на разных инструментах, представлены на рисунке 1.3.

Для анализа SN 2009nr использовалось 2 режима работы программы SNOOPy. Первый режим позволяет определить максимум в полосах  $B, V, R, I$ , момент максимума  $t_{B_{max}}$  в  $B$  фильтре, а также параметр  $\Delta m_{15}$ . Последний параметр соответствует  $\Delta m_{15}(B)$ , но определяется фитированием кривой блеска во всех фильтрах. Второй — даёт оценки поглощения в родительской галактике  $E(B - V)_{host}$ , модуль расстояния  $\mu$ ,  $t_{B_{max}}$  и  $\Delta m_{15}$ . Были получены следующие результаты (таблица 1.1).

Как видно из рисунка 1.3, наблюдения хорошо описываются модельными кривыми блеска, полученными с помощью SNOOPy. Оценки времени  $t_{B_{max}}$  в обеих версиях кода почти совпали друг с другом. Максимум в фильтре  $B$  произошёл примерно за два дня до максимума в фильтре  $V$ , что типично для SN Ia. Заметим, что абсолютная звёздная величина SN 2009nr, рассчитанная с использованием кода SNOOPy, составила  $M_V = -19.6^m$ , что согласуется с другими оценками [117].

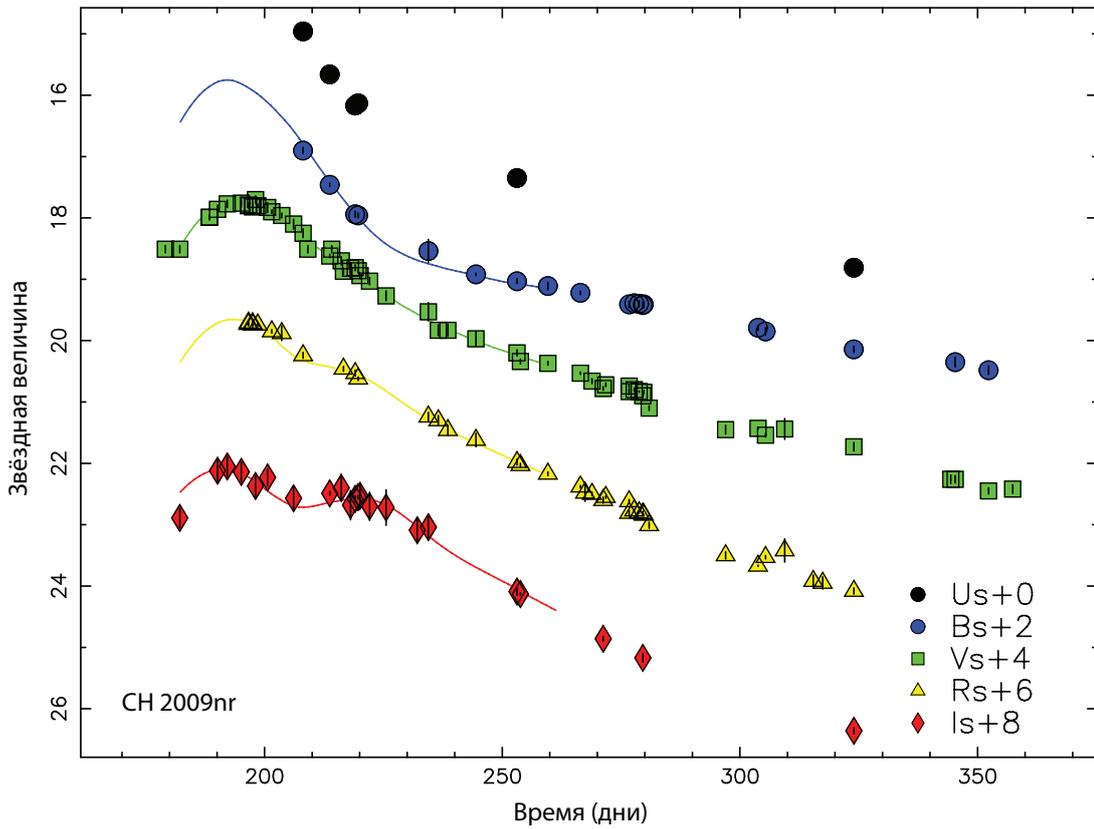


Рис. 1.3: Кривые блеска SN 2009nr. Данные взяты из работы [97]. Непрерывные кривые, аппроксимирующие наблюдения — результат работы программы SNooPy.

Таблица 1.1: Результаты обработки кривых блеска SN 2009nr в программе SNooPy.

Первый режим	Второй режим
$B_{max} = 13.66^m \pm 0.02^m$	$E(B - V)_{host} = 0.11 \pm 0.03$
$V_{max} = 13.66^m \pm 0.02^m$	$\mu = 32.93 \pm 0.04$
$R_{max} = 13.64^m \pm 0.02^m$	$t_{max}(B) = JD2455192.0 \pm 0.2$
$I_{max} = 14.08^m \pm 0.02^m$	$\Delta m_{15} = 0.82 \pm 0.03$
$t_{max}(B) = JD2455192.3 \pm 0.3$	
$\Delta m_{15} = 0.96 \pm 0.02$	

Независимая обработка SN 2009nr и анализ результатов были выполнены в работе Рубаба Кхана и др. [117]. Они использовали телескопы с апертурами от 10 см до 2.5 м для получения фотометрических данных и от 2.5 м до 6.5 м для получения спектральных данных. Их результаты следующие:  $t_{B_{max}} = 2455193.2 \pm 0.3$ ,  $\Delta m_{15}(B) = 0.93 \pm 0.02$ ,  $E(B - V)_{host} = 0.00 \pm 0.01$ ,  $\mu = 33.27 \pm 0.15$ . Значения  $\Delta m_{15}$ , полученные

в двух версиях SNooPy и в работе Кхана и др., различаются лишь слегка, тогда как оценки  $E(B - V)_{host}$  не очень хорошо согласуются между собой. SNooPy даёт большее поглощение, в результате чего  $\mu$ , а следовательно, и расстояние до сверхновой, становится меньше. По-видимому, это неучтённые ошибки использованных методов «стандартизации». Избыток цвета  $E(B - V)_{host}$  для SN 2009nr должен быть небольшим, поскольку она взорвалась практически в межгалактическом пространстве, где поглощение практически отсутствует.

## 1.4 Механизмы взрыва

### 1.4.1 Основные механизмы

Сейчас представляется общепринятым, что SN Ia являются результатом термоядерного взрыва белого карлика (см. обзор [118]). Устойчивость одиночного БК поддерживается за счёт давления вырожденного электронного газа. Однако существует некая предельная масса, достигнув которой, БК теряет свою устойчивость — предел Чандрасекара. Если масса БК по каким-то причинам превышает этот предел, происходит его взрыв, полностью разрушающий звезду. Во время взрыва рождается большое количество  $^{56}\text{Ni}$ , распад  $^{56}\text{Ni}$  и продуктов его распада формирует кривую блеска SN Ia.

Как именно БК достигает предела Чандрасекара, до сих пор неясно. Существует два основных механизма взрыва. SD-механизм<sup>1</sup>, или механизм Шацмана, реализуется в двойных системах, где взрыв — это результат аккреции на БК со звезды-компаньона, заполнившей полость Роша [119]. Компаньон может быть красным гигантом, субгигантом, звездой главной последовательности, гелиевой звездой. У этой модели есть слабые места: во-первых, в спектрах SN Ia не наблюдаются линии водорода (должны быть от звезды-компаньона), а во-вторых, на месте сверхновых звёзд ни разу не был найден компаньон.

Другой механизм — DD<sup>2</sup> — это слияние двух БК с общей массой больше предела устойчивости [120, 121]. Если два БК образуют двойную си-

<sup>1</sup>SD — single degeneration.

<sup>2</sup>DD — double degeneration.

стему, то рано или поздно они сольются из-за излучения гравитационных волн. Этот механизм приводит к полному разрушению БК и объясняет отсутствие второго компаньона в наблюдениях.

Существуют наблюдательные ограничения на возможные механизмы взрыва СН Ia. Например, известно, что СН Ia встречаются не только в спиральных, но и в эллиптических галактиках, где интенсивное звёздообразование отсутствует уже миллиарды лет. Чтобы достигнуть возраста эллиптической галактики, масса звезды компаньона не должна превышать  $0.9\text{--}1 M_{\odot}$ , что сужает круг возможных компаньонов БК в механизме Шацмана [122]. Исследования близкой СН Ia — 2011fe — также сузили круг возможных компаньонов БК [123]. Однако до сих пор есть аргументы, поддерживающие/опровергающие обе модели. Открытие в последние годы сверхъярких сверхновых поставило ещё больше вопросов касательно возможных механизмов взрыва СН Ia.

#### 1.4.2 Механизмы взрыва в эллиптических галактиках

Интерес к сверхновым типа Ia, по которым была заподозрена тёмная энергия во Вселенной [4, 5], подвигнул астрономов к массовому открытию сверхновых звёзд. Число изученных на сегодняшний момент сверхновых звёзд почти в 50 раз превышает уровень десятилетней давности. Массовое открытие сверхновых звёзд в последние годы позволило подтвердить, что частота взрывов СН Ia в эллиптических галактиках сильно зависит от возраста галактики, как было предсказано методом популяционного синтеза более 15 лет назад [31].

В эллиптических галактиках нет существенного звёздообразования. После первого миллиарда лет эволюции в них остаются только маломассивные звёзды. Все массивные звёзды ( $c M > 8\text{--}10 M_{\odot}$ ) полностью заканчивают свою эволюцию образованием нейтронных звёзд и чёрных дыр. Сами по себе маломассивные звёзды не могут породить вспышки сверхновых, так как их эволюция заканчивается мягким сжатием и образованием белых карликов с массой меньше предела устойчивости. Однако в двойной системе возможен отложенный (через миллиарды лет) набор массы до Чандрасекаровского предела — либо в результате аккреции

вещества со второго компаньона (SD-механизм) [119], либо в результате слияния (DD-механизм) [120, 121].

Уже первый эволюционный расчёт таких процессов в эллиптических галактиках (популяционный синтез), проведённый с помощью специального компьютерного кода — Машина Сценариев [24, 25] — показал, что механизм слияния белых карликов на два порядка эффективнее аккреционного уже через миллиард лет после образования эллиптической галактики [31] (см. Рис. 1.4).

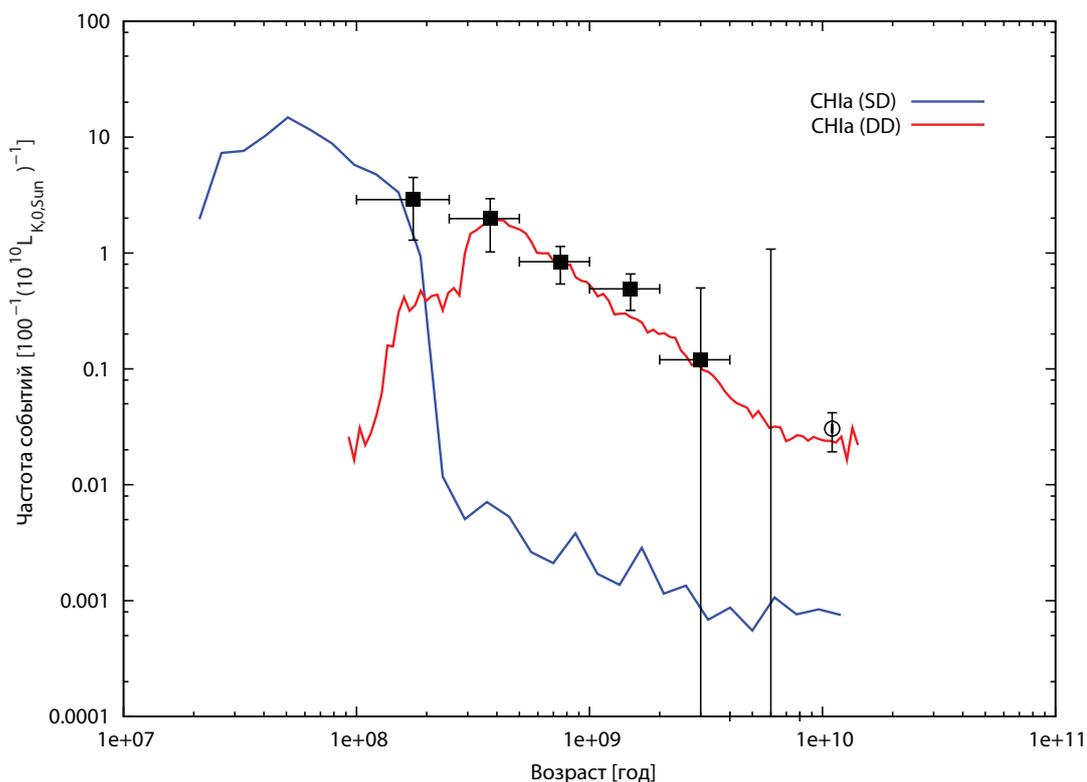


Рис. 1.4: Эволюция скорости взрывов сверхновых [на  $(100 \text{ лет})^{-1}$ ] после  $\delta$ -образного звёздообразования для галактики, чья полная светимость составляет  $10^{10} L_{K,0,\odot}$  в  $K$  полосе в момент времени  $t = 11$  млрд. лет. Синяя кривая соответствует механизму Шацмана, красная — механизму, связанному со слиянием БК. Закрашенные квадратики — наблюдательные точки [32]. Незакрашенная точка получена из анализа эволюции скорости взрывов сверхновых в близких эллиптических галактиках [124].

Изучение сверхновых в последние годы позволило впервые говорить о наблюдаемой эволюции частоты сверхновых в эллиптических галактиках [32] (Рис. 1.4). Эти результаты были получены по наблюдению кандидатов в СН Ia по данным обзора Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). При этом возраст эллиптических галактик определялся на ос-

новании 9-полосной фотометрии от оптики до среднего ИК диапазона. В результате было получено, что наблюдаемое уменьшение скорости взрывов СН Ia описывается законом  $f \sim t^{-\alpha}$ , где  $\alpha \approx 1$ .

Поскольку наблюдатели сверхновых измеряют частоту сверхновых на  $10^{10} L_{K,0,\odot}$  в  $K$  полосе, старые данные были переделаны в новый график в предположении, что  $M_*/L_{K,0} = 1.8[M_\odot/L_{K,\odot}]$  в соответствии с современными данными. Было получено прекрасное согласие с частотой, предсказанной на основании теории эволюции двойных звёзд [31] (см. Рис. 1.4).

Популяционный синтез представляет собой непростую численную схему, которая включает в себя наши знания и гипотезы об эволюции двойных звёзд и наблюдаемые свойства двойных звёзд: начальное распределение по массам и начальное распределение по полуосям. Однако, как будет показано далее, полученный в 1997 году результат, как и более современные расчёты [125, 126, 32, 127, 128, 129], крайне слабо чувствителен к «тёмным местам» эволюции двойных звёзд.

Решающим обстоятельством здесь является форма начального распределения двойных систем по расстоянию между компонентами ( $a$ ). Как было показано [130, 131], наблюдаемое в Галактике распределение двойных звёзд, находящихся в самом начале своего пути (на главной последовательности), описывается законом:

$$dN \sim \phi(a)da \sim \frac{1}{a}da \quad (1.9)$$

Это распределение представляет собой до сих пор теоретическую загадку и на качественном уровне может быть сформулировано следующим образом: в Галактике число широких и тесных двойных систем примерно одинаково (в равные логарифмические интервалы — декады — попадает одинаковое число звёзд). В качестве первого приближения можно предположить (как это и делается при популяционном синтезе), что подобное начальное распределение двойных звёзд реализуется и в других галактиках. Нет особых оснований считать, что двойные звёзды в других галактиках образуются по-другому. После образования двойная система претерпевает долгую, многообразную эволюцию с изменением расстояния между звёздами. В маломассивных двойных системах наи-

более важным и наименее понятным эволюционным фактором является стадия с общей оболочкой, когда одна из звёзд оказывается фактически внутри другой, распухшей до стадии красного гиганта. На стадии с общей оболочкой звёзды катастрофически сближаются. Однако благодаря начальному степенному распределению 1.9 сближение в некое число раз, практически независимое от расстояния между звёздами, не влияет существенно на функции распределения. Таким образом, логично предположить, что в момент образования двойных белых карликов функция распределения их по расстоянию по-прежнему описывается плоским законом 1.9.

Далее эволюция каждой двойной системы — это медленное сближение белых карликов благодаря излучению гравитационных волн, которое описывается формулой Эйнштейна [132]:

$$\frac{da}{dt} \sim a^{-3}(M_1 + M_2)M_1M_2, \quad (1.10)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  — массы компаньонов, которые принимаются равными. Поскольку эволюция звезды до образования белого карлика в основном определяется термоядерным временем горения водорода  $T \sim 10^{10}(M/M_\odot)^{-2}$  лет, можно ожидать, что в действительности время слияния будет определяться неким степенным законом.

На самом деле изменение скорости вспышек сверхновых в DD-механизме не зависит от закона сближения.

Скорость слияния белых карликов (*Rate*) пропорциональна числу систем с данным разделением по полуосям и скорости уменьшения расстояния между компонентами:

$$\frac{da}{dt} \sim a^n \rightarrow t \sim a^{-n+1}. \quad (1.11)$$

Пусть  $\phi \sim a^{-\beta}$ , тогда скорость слияния:

$$Rate \sim \phi \frac{da}{dt} \sim a^{-\beta} a^n \sim t^{-\frac{n-\beta}{n-1}} \quad (1.12)$$

Замечательно, что если  $\beta = 1$  (см. уравнение 1.9), то этот результат не зависит от конкретного механизма слияния (ср. с [32]) — важно только, чтобы время слияния определялось начальным разделением по

полуосям. Это особенно важно, поскольку образование двойных белых карликов представляет собой не мгновенный процесс. В первом приближении время жизни звезды с массой  $M$  пропорционально  $M^{-2}$  и, следовательно, новые двойные белые карлики будут появляться в эллиптической галактике и через миллиарды лет. Однако они по-прежнему будут распределены по закону 1.9, и закон 1.12 не изменится.

Таким образом, наблюдаемое изменение скорости сверхновых в эллиптических галактиках подтверждает не только модель сливающихся белых карликов как основного механизма взрывов СН Ia. На ранних временах ( $\sim 10^8$  лет) SD-механизм является определяющим, поэтому ожидается высокая светимость галактик этого возраста в мягком рентгеновском диапазоне.

В заключение хотелось бы прокомментировать недавнюю работу [133], в которой делается вывод о превалирующей роли DD-механизма совершенно из других соображений. Логика этой работы очень простая: чтобы работал механизм Шацмана, должна идти постоянная аккреция, а следовательно, и мягкое рентгеновское излучение, которого на самом деле не наблюдается в необходимом количестве. Однако, во-первых, отсутствие чего-либо не может быть положительным доказательством, а во-вторых, для SD-механизма важна не скорость аккреции, а важен интегральный по времени набор массы. Следовательно, и рентгеновская светимость не связана с темпом взрывов сверхновых. В эллиптических галактиках БК могут накапливать массу в системах трёх типов: (1) если красный или жёлтый карлик (второй компаньон) заполнит свою полость Роша (такие системы наблюдаются как катаклизмические переменные), (2) гелиевая звезда заполнит свою полость Роша или (3) в широких системах, где компаньоном является красный гигант (симбиотические звёзды). В первом случае теоретические расчёты показывают, что БК может накапливать массу только, если темп аккреции превысит  $10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ , в противном случае водородно-гелиевое вещество не будет перегорать во время аккреции, а, накопившись, будет сбрасываться во время вспышек повторных новых звёзд. Именно это обстоятельство используют авторы статьи [133], чтобы предсказать рентгеновскую светимость эллиптических галактик. Однако никто не может сказать, какая доля накопившегося ве-

щества при взрыве новой звезды остаётся на белом карлике и приближает его к Чандрасекаровскому пределу. Например, если остаётся хотя бы 5–10%, то этого достаточно для перехода тяжёлых карликов в неустойчивое состояние. При этом рентгеновская светимость будет крайне малой. В случае симбиотических двойных — всё мягкое рентгеновское излучение будет поглощаться в истекающем звёздном ветре красного гиганта. Таким образом, обсуждение роли поглощения в оболочках симбиотических и гелиевых звёзд, рентгеновских спектров, стационарности горения в аккреционном потоке показывает, какой длинный путь должна пройти теория, чтобы отсутствие рентгеновского излучения стало сильным убедительным аргументом.

## 1.5 «Чистые» сверхновые

Замечательной особенностью сверхновых звёзд типа Ia является универсальность их кривых блеска и постоянное значение абсолютной звёздной величины в максимуме, что объясняется схожестью физических процессов, приводящих к феномену вспышки. Обычно это термоядерный взрыв углеродно-кислородного белого карлика, масса которого стала больше Чандрасекаровской в результате аккреции (механизм Шацмана) [119], или слияние двух белых карликов с общей массой больше предела устойчивости [120, 121]. К сожалению, из-за возможных различий в механизмах взрыва, в химическом составе и массах звёзд-прародителей СН Ia наблюдаемые кривые блеска различаются между собой. С появлением большого числа хорошо изученных сверхновых выяснилось, что абсолютная звёздная величина в максимуме может изменяться в пределах  $1^m$ . Тем не менее, есть способы, позволяющие определить абсолютный блеск каждой СН Ia в максимуме (см. раздел 1.2).

Несмотря на современные методы стандартизации кривых блеска, существуют сомнения в верности гипотезы «стандартной свечи». Во-первых, к эффекту ослабления далёких сверхновых могла бы приводить так называемая серая пыль, поглощение которой не зависит от длины волны и практически его нельзя учесть [18]. Это могут быть крупные частицы пыли с характерными размерами больше  $0.01 \mu m$  [134]. В частности, количество такой пыли пропорционально темпу звездообразова-

ния, который растёт в прошлое, и могло бы создавать кажущееся падение мощности далёких сверхновых. С целью объяснения наблюдаемого ослабления блеска далёких сверхновых Ia в работах [134, 135] был привлечён механизм поглощения межгалактической серой пылью. Однако Бассетт и Кунз [136] исключили эту возможность. К тому же наблюдения далёких квазаров показывают, что если серая пыль и присутствует в межгалактическом пространстве, то она не может давать поглощение больше  $0.1^m$  [137].

Другое дело — серая пыль внутри родительских галактик. Её количество может также эволюционировать с возрастом, создавая кажущийся эффект ослабления блеска сверхновых. Такая пыль заведомо есть в галактиках (см. [138]). Кроме того, чем дальше мы заглядываем вглубь Вселенной, тем более раннее в химическом смысле население звёзд мы видим. Это связано с постепенной химической эволюцией Вселенной, возникающей при термоядерном горении первичных водорода и гелия в более тяжёлые элементы в звёздах. Вполне возможно, что взрыв СН Ia зависит от химического состава звезды на главной последовательности.

Недавнее открытие сверхъярких СН Ia [139] подтверждает существующий разброс значений светимостей сверхновых в максимуме. Наличие таких объектов вполне предсказуемо в рамках модели сливающихся белых карликов, сумма масс которых не постоянна и медленно меняется с хаббловским временем Вселенной. Дело в том, что на ранних стадиях эволюции Вселенной происходили слияния в среднем более массивных белых карликов, чем сейчас. Согласно расчётам А.В. Тутукова [18], средняя энергия сверхновых Ia должна возрасти с  $z > 2$  и существенно увеличиваться на  $z > 8$ . Но очень далёкие сверхновые ещё не открыты в достаточном количестве, чтобы стало возможным делать выводы о влиянии суммарной массы звёзд-прародителей на абсолютную звёздную величину сверхновых. А для открываемых в большом количестве близких сверхновых до  $z = 1$  этот эффект несущественен.

Чтобы избавиться от возможного влияния трёх факторов — серой внутригалактической пыли, химической эволюции и возможных различий в механизмах взрыва белых карликов — в работе предложен особый подкласс «чистых сверхновых».

### 1.5.1 Метод отбора

Идея нашего подхода состоит в том, чтобы использовать только те сверхновые, которые лежат на большом расстоянии от центра родительской галактики. Во-первых, на больших расстояниях от ядра (или высоко над плоскостью, если мы имеем дело со спиральной родительской галактикой, видимой с ребра) располагаются наиболее старые, бедные металлами звёзды с возрастом, сравнимым с возрастом Вселенной. Это автоматически приводит к более однородному химическому составу звёзд-прародителей. Во-вторых, удалённые от центра галактик СН Ia скорее всего имеют общий механизм взрыва, а именно — слияние белых карликов. Это связано с тем, что в гало галактик нет звёзд средней массы, которые могли бы обеспечить набор вещества белыми карликами в двойных системах. Механизм Шацмана (или SD-механизм) [119] предполагает набор массы белым карликом до Чандрасекаровского предела в двойных системах с темпом перетекания более  $10^{-8}$ – $10^{-7}$   $M_{\odot}$ /год. В эллиптических галактиках механизм слияния белых карликов обеспечивает до 99% взрывов сверхновых Ia (см. раздел 1.4.2, [27]). В-третьих, в гало галактик пыли практически нет. Например, в нашей галактике толщина пылевого слоя не превышает нескольких килопарсек даже на краю (15–20 кпк). В эллиптических галактиках пыль отсутствует даже глубоко внутри галактики, к тому же возраст, и, следовательно, химический состав эллиптических галактик вполне соответствует бедным металлами звёздам первого поколения. Но крайне затруднительно определить тип родительских галактик для далёких сверхновых с красным смещением  $z \sim 1$ . Поэтому рассматривались только сверхновые, далёкие от центра родительской галактики.

К настоящему времени проведены детальные фотометрические и спектральные наблюдения большого числа СН Ia. Для данной работы использовались сверхновые из статей [140, 141]. В работе [140] авторы использовали выборку из 414 сверхновых, открытых как небольшими давними обзорами, так и крупными, включая SNLS [106], ESSENCE [107], SDSS [105]. Обработка кривых блеска осуществлялась в работе [140] с помощью метода SALT, в основе которого лежит использование синтетического спектра сверхновой Ia [80]. Сверхновые, не удовлетворяв-

шие условиям обработки (недостаточное количества фотометрических наблюдений, наличие данных только в одном фильтре), были исключены из рассмотрения. В финальную выборку вошло 307 сверхновых, для которых методом SALT были определены видимая и абсолютная звёздные величины в  $B$  фильтре, показатель цвета ( $B - V$ ) в максимуме и  $s$ -фактор [35] — параметр, позволяющий привести исследуемую кривую блеска к модельной кривой путём растяжения или сжатия временной оси. Сверхновые из работы [141] также представляют собой компиляцию данных из разных обзоров, но, тем не менее, все они были обработаны одним способом.

На первом шаге с помощью баз данных HyperLeda [142] и SIMBAD<sup>1</sup> из всех сверхновых были выбраны те, которые находятся далеко за пределами родительской галактики. Количественным критерием служило расстояние от центра галактики в единицах D25 галактики (имеется в виду фотометрический размер изофоты 25-й звёздной величины с квадратной угловой секунды в фильтре  $B$ ). Если расстояние превышало D25, сверхновая считалась далёкой. После просмотра получившегося списка были отсеяны сомнительные случаи спиральных и взаимодействующих галактик, где затруднительно провести границу родительской галактики. Кроме сверхновых, далёких от центра галактики, были отобраны сверхновые, чья родительская галактика уверенно классифицировалась как эллиптическая. Затем были просмотрены объекты, открытые космическим телескопом Хаббл [143, 144] на больших расстояниях ( $z > 0.2$ ). Здесь выборка производилась визуально. К ним были добавлены 2 сверхновые в гало SN 2008gy [145] и SN 2009nr [97, 117], открытые в обзоре роботизированной сети МАСТЕР. Отметим, что SN 2008gy и SN 2009nr представляют собой наиболее подробно исследованные близкие сверхновые, которые практически находятся в межгалактическом пространстве. Таким образом, появился список «чистых» сверхновых, готовый для построения диаграммы Хаббла (см. таблицу 1.2).

Для составления таблицы использовались координаты из базы данных SIMBAD. С помощью базы данных HyperLeda [142], каталога сверхновых звёзд ГАИШ [146] и Asiago Supernova Catalogue [147] был най-

---

<sup>1</sup><http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

ден номер галактики по номенклатуре PGC (Principal Galaxy Catalog). В шестом столбце таблицы представлены расстояния в единицах D25 от сверхновой до центра галактики. При расчёте этого расстояния было учтено, что поверхностная яркость галактик падает с расстоянием как  $(1+z)^4$  (парадокс Ольберса). Для близких сверхновых этот эффект пренебрежимо мал, но для далёких объектов его необходимо учитывать.  $R_c$  — расстояние между сверхновой и центром галактики в килопарсеках. В последнем столбце приведён тот критерий, по которому данная сверхновая была включена в выборку.

Таблица 1.2: Список СН Ia, вошедших в итоговую выборку. Первый столбец — название сверхновой; второй столбец — экваториальные координаты ( $\alpha, \delta$ ); третий столбец — красное смещение; четвёртый столбец — модуль расстояния; пятый столбец — номер галактики по номенклатуре PGC; шестой столбец — расстояние в единицах D25 от сверхновой до центра галактики; седьмой столбец —  $R_c$ , расстояние между сверхновой и центром галактики в кпк; восьмой столбец — критерий отбора (1 — D25, 2 — E галактика, 3 — находится в межгалактическом пространстве, 4 — визуально).

Название	$\alpha, \delta$	$z$	$\mu$	PGC	D25	$R_c$	Критерий
1992bo	01 21 58.44 —34 12 43.5	0.0172	34.65 (0.19)	4972	1.10	25.7	1
2000bk	12 33 53.94 —07 22 42.9	0.0266	35.52 (0.09)	41748	1.16	32.9	1
2003fa	17 44 07.72 +40 52 51.6	0.039	36.212 (0.157)	60771	1.43	39.2	1
2005ms	08 49 14.34 +36 07 47.9	0.026	35.489 (0.176)	24788	0.95	23.1	1
2008bf	12 04 02.90 +20 14 42.6	0.026	35.177 (0.178)	38146	0.85	27.3	2
2001ie	10 16 50.70 +60 16 44.5	0.031	35.798 (0.203)	030027	0.49	17.0	2
2002dj	13 13 00.34 —19 31 08.7	0.010	32.960 (0.308)	45908	0.05	2.0	2
2002do	19 56 12.88 +40 26 10.8	0.015	34.315 (0.230)	63832	0.22	2.6	2
2002he	08 19 58.83 +62 49 13.2	0.025	35.311 (0.181)	23371	0.44	21.0	2
2006nz	00 56 29.21 —01 13 36.1	0.037	36.267 (0.162)	73507	0.20	3.0	2
2007ci	11 45 45.85 +19 46 13.9	0.019	34.656 (0.202)	36670	0.17	4.9	2
2008af	14 59 28.50 +16 39 12.3	0.034	35.903 (0.187)	53552	0.33	22.1	2
1992au	00 10 40.48 —49 56 45.3	0.0603	36.92 (0.08)	471591	0.86	25.2	2
1997cn	14 09 57.76 +17 32 32.3	0.0170	34.64 (0.15)	050558	0.12	4.4	2
1998bp	17 54 50.74 +18 19 50.5	0.0102	33.51 (0.34)	061091	0.15	3.1	2
1999gh	09 44 19.75 —21 16 25.0	0.0088	32.60 (0.25)	027885	0.18	9.9	2
2000B	07 05 40.73 +50 35 10.5	0.0201	34.49 (0.14)	020136	0.23	9.1	2
2000dk	01 07 23.52 +32 24 23.2	0.0164	34.18 (0.29)	003981	0.65	3.3	2
1994m	12 31 08.61 +00 36 19.6	0.0243	35.08 (0.19)	041409	0.30	14.7	2
1996x	13 18 01.13 —26 50 45.3	0.0070	32.11 (0.35)	046330	0.27	8.9	2
1992br	01 45 44.83 —56 05 57.9	0.0876	38.19 (0.16)	-	-	-	2
1994am	02 40 02.06 —01 37 14.9	0.3720	41.16 (0.15)	-	-	-	2
1997ac	08 24 05.21 +04 11 22.6	0.3200	41.19 (0.34)	-	-	-	2
1990Y	03 37 22.59 —33 02 34.7	0.0387	36.31 (0.10)	-	-	-	2

1992ae	21 28 17.94 −61 33 01.4	0.0746	37.67 (0.15)	-	-	-	2
2009nr	13 10 58.95 +11 29 29.3	0.0122	33.27 (0.15)	45750	0.71	-	3
2008gy	03 10 00.96 +19 13 23.1	0.029	35.74 (0.17)	1584648	-	12.2	3
HST04 Sas	12 36 54.125 +62 08 22.21	1.39	44.83 (0.59)	-	-	-	4
HST05 Spo	12 37 06.53 +62 15 11.70	0.839	43.60 (0.21)	-	-	-	4
HST05 Fer	12 36 25.10 +62 15 23.84	1.020	43.98 (0.24)	-	-	-	4
HST05 Lan	12 36 56.72 +62 12 53.33	1.230	44.85 (0.24)	-	-	-	4
2003es	12 36 55.39 +62 13 11.9	0.954	44.06 (0.15)	-	-	-	4
2002kd	03 32 22.34 −27 44 26.9	0.735	43.11 (0.18)	-	-	-	4

### 1.5.2 Анализ диаграммы Хаббла

На диаграмму Хаббла (зависимость модуля расстояния от красного смещения) были нанесены сверхновые Ia, которые взорвались далеко от центра родительской галактики или в E галактиках. Для построения диаграммы использовались данные из таблицы 1.2. С помощью написанных в среде MATLAB программ данные были аппроксимированы методом « $\chi$ -квадрат» (МНК с «весами»). Через точки наилучшим образом проводилась следующая теоретическая кривая:

$$\mu = \log(d_l) - 5$$

$$d_l = (1 + z) \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_m(1 + z')^3 + \Omega_\Lambda}}, \quad (1.13)$$

где  $\mu$  — модуль расстояния с учётом  $s$ -фактора,  $K$ -поправки и поглощения;  $d_l$  — фотометрическое расстояние;  $c$ ,  $H_0$  — скорость света и постоянная Хаббла. При расчётах  $H_0$  берётся равным 70 км/с/Мпк. Так как в предполагаемой модели  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ , то единственный неизвестный параметр —  $\Omega_\Lambda$ . Значение плотности тёмной энергии подбирается так, чтобы сумма квадратов отклонений наблюдательных точек от теоретической кривой 1.13 была минимальна. Для наглядности на этот же график была нанесена кривая для  $\Omega_\Lambda = 0$ . Видно, что даже для сверхновых, которые взорвались в областях, где поглощение (в том числе и серое) минимально, поведение диаграммы Хаббла показывает наличие  $\Omega_\Lambda$ , ускоренное расширение Вселенной! По этим данным Вселенная расширяется с значением  $\Omega_\Lambda = 0.66 \pm 0.18$  (Рис. 1.5).

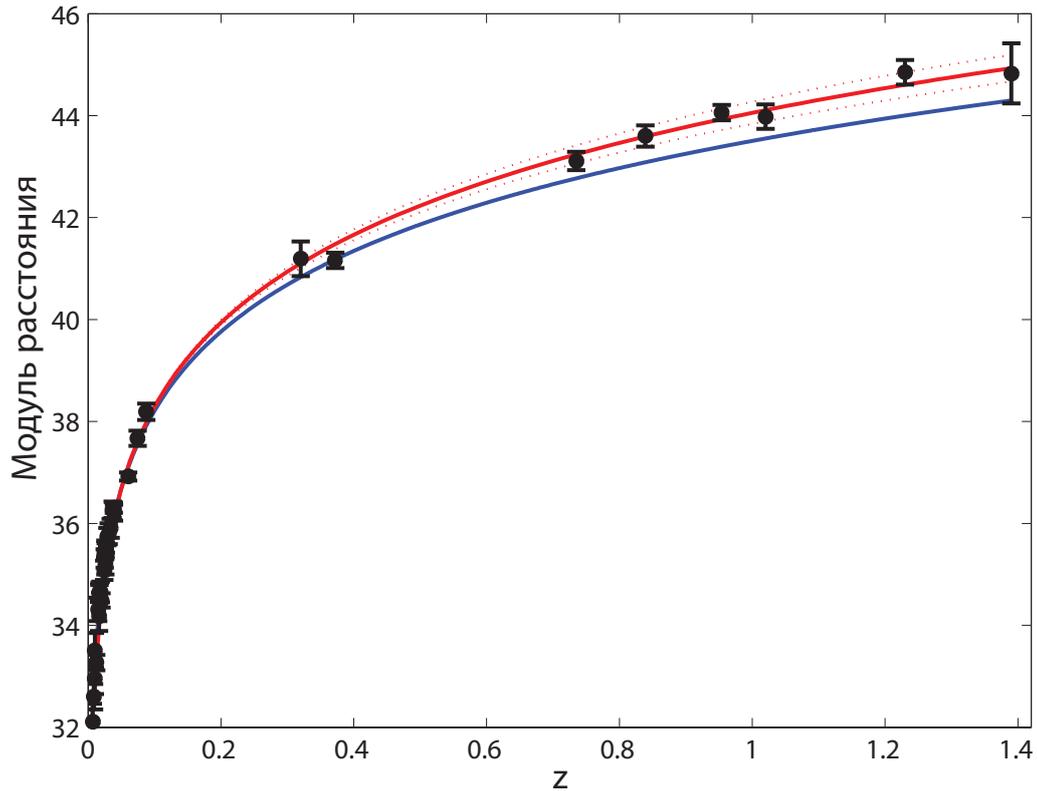


Рис. 1.5: Диаграмма Хаббла для «чистых» СН Ia, построенная по точкам из таблицы 1.2. Красная кривая — кривая, наилучшим образом приближающая наблюдательные данные; синяя кривая — кривая, соответствующая Вселенной без тёмной энергии; пунктирные линии — 95% доверительный интервал.

Для того чтобы ответить на вопрос: отличается ли подкласс «чистых» сверхновых от остальных СН Ia, аналогичным образом были рассмотрены сверхновые из таблицы 1.2, но до  $z < 0.06$  (Рис. 1.6). «Чистые» сверхновые взорвались на большом расстоянии от центра галактики или в эллиптических галактиках. В обоих случаях механизм взрыва один и тот же: слияние двух белых карликов. Уже через миллиард лет после образования эллиптической галактики механизм, связанный со слиянием белых карликов, становится на два порядка эффективнее аккреционного [27]. А далеко от центра спиральных галактик все звёзды уже давно проэволюционировали, и аккреционный механизм не может быть реализован. Кроме того, химический состав этих сверхновых должен быть примерно одинаков. Таким образом, мы имеем физически более однородный класс сверхновых.

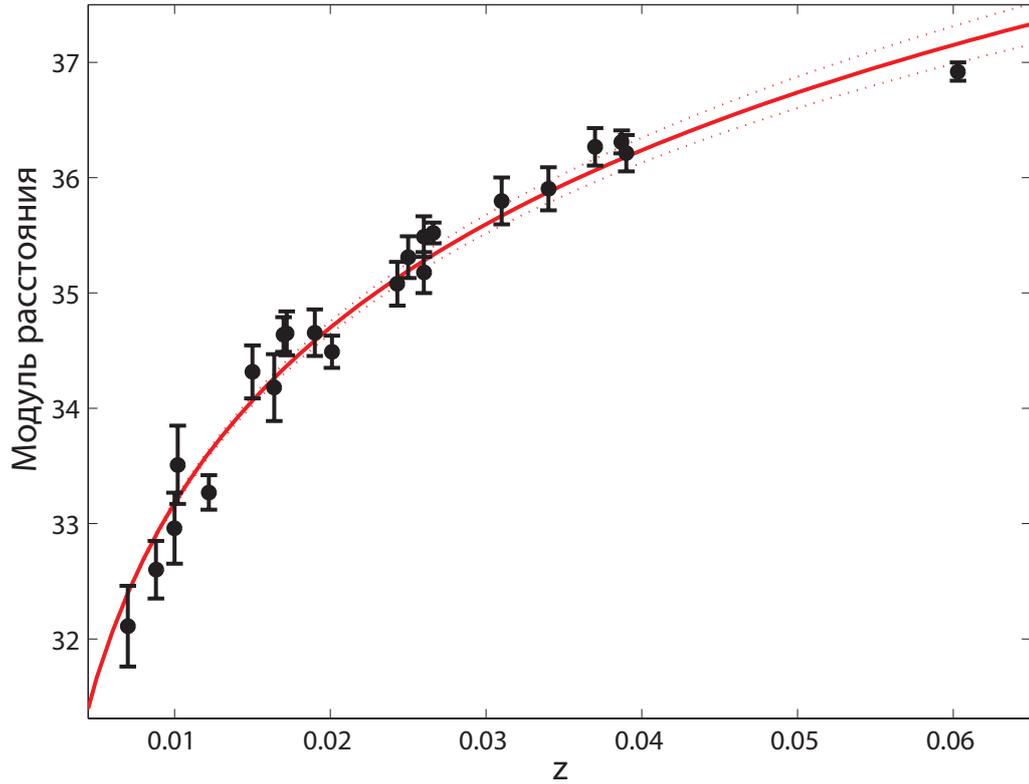


Рис. 1.6: Диаграмма Хаббла для «чистых» СН Ia, взятых из таблицы 1.2 до  $z = 0.06$ . Пунктирные линии — 95% доверительный интервал.

Рисунок 1.7 показывает, насколько сильно отклоняются от средней кривой «чистые» сверхновые и все остальные сверхновые из работ [140, 141] до  $z < 0.06$ . Для количественной оценки дисперсии используется выражение:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}{n - m}, \quad (1.14)$$

где  $n$  — число сверхновых выборки,  $m$  — количество параметров, используемых при проведении процедуры аппроксимации ( $\Omega_\Lambda$ ),  $y_i$  — наблюдательные точки на диаграмме Хаббла,  $y$  — теоретические значения, соответствующие этим точкам.

Прежде всего мы отмечаем, что у «чистых» сверхновых ( $z < 0.06$ ) значительно меньше дисперсия, чем у всех сверхновых. Так, средняя дисперсия в звёздных величинах для «чистых» сверхновых составила 0.04, в то время как для остальных сверхновых из работ [140, 141] она

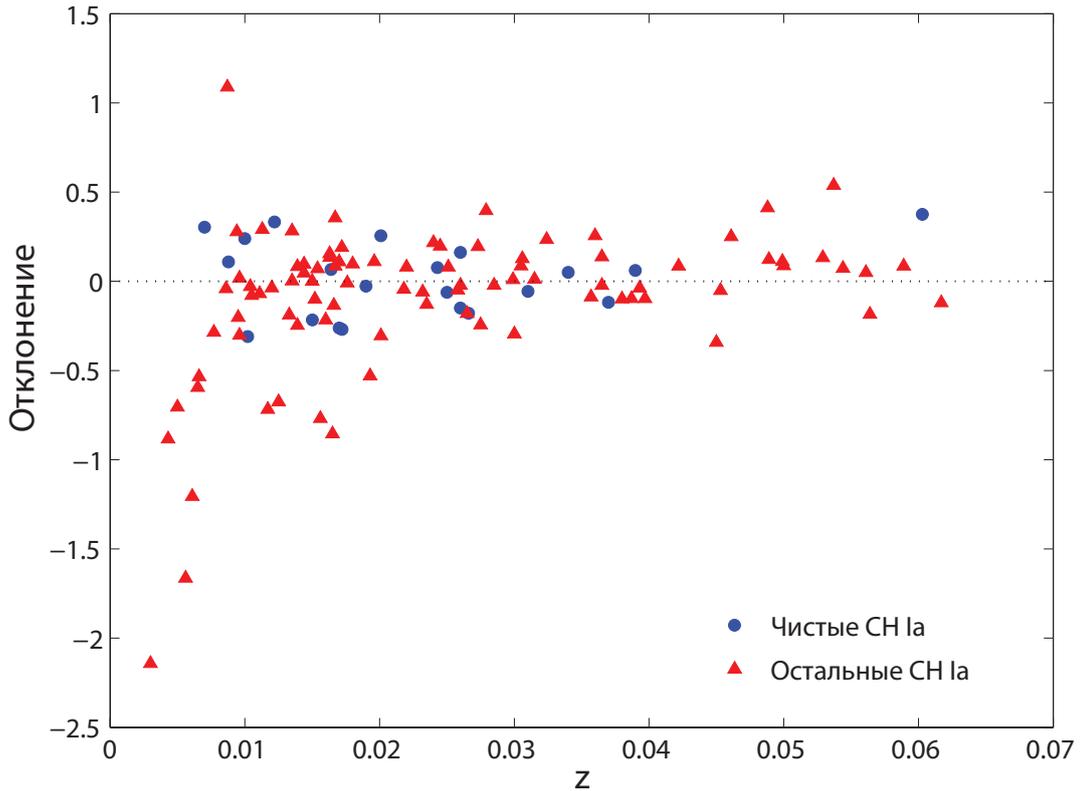


Рис. 1.7: Отклонение в звёздных величинах наблюдательных точек (сверхновых) от теоретической кривой, аппроксимирующей эти точки на диаграмме Хаббла.

составляет 0.2. Это доказывает, что «чистые» сверхновые Ia являются более однородным классом сверхновых звёзд.

## 1.6 Обсуждение

Сверхновые звёзды типа Ia играют огромную роль в разных областях астрофизики. Их изучение очень важно для задач космологии, ведь эти объекты оказались прекрасными индикаторами расстояний во Вселенной ввиду их больших светимостей и удивительной схожести кривых блеска. Они также пролили свет на понимание химической эволюции галактик, объяснив наличие тяжёлых элементов в межзвёздном пространстве. Тем не менее, остаются вопросы, связанные со стандартностью СН Ia, пониманием физики механизма взрыва и природы тех процессов, которые приводят к феномену сверхновых.

Что касается стандартности сверхновых Ia, то здесь с каждым годом возникает всё больше вопросов. Было найдено, что существует несколько возможных механизмов взрыва сверхновых Ia. В зависимости от реализующегося механизма блеск сверхновых может меняться. Также взрыв СН Ia может зависеть от химического состава звезды-прародителя. С помощью зависимости параметров кривых блеска от абсолютной звёздной величины сверхновых строятся алгоритмы оптимизации кривых блеска. Но на данный момент указанная зависимость исследована не полностью, и значения входящих в неё параметров меняются от работы к работе. С ростом объёма данных процедура обработки кривых блеска усложняется. Если раньше основным параметром, описывающим кривую блеска, был её наклон, то теперь стали учитывать ещё изменение показателя цвета сверхновых. Наиболее эффективные из методов стандартизации позволяют сократить дисперсию на диаграмме Хаббла до  $0.1^m$ , что соответствует 5% точности в определении расстояний (см. пункт 1.2). Соотношения, позволяющие определять абсолютную звёздную величину сверхновых, получаются и в теоретических моделях. Считается, что эти соотношения учитывают небольшой разброс в массах взрывающихся БК и частично различия в химическом составе. Однако они не учитывают серое поглощение, особенно если свойства и состав пыли эволюционируют со временем или меняются от галактики к галактике. Один из методов стандартизации СН Ia был применён к анализу кривой блеска «чистой» СН 2009nr (см. пункт 1.3).

В разделе 1.5 был рассмотрен вопрос о нарушении стандартности блеска, связанный с поглощением излучения серой пылью в родительских галактиках. Согласно гипотезе о сером поглощении, ускоренное потемнение сверхновых обусловлено в первую очередь поглощением излучения серой пылью, влияние которой пока не учитывается стандартными процедурами по учёту поглощения [117]. Кроме того, в прошлом количество серой пыли было больше. Для исследования этого эффекта были рассмотрены сверхновые, взорвавшиеся далеко от центра родительской галактики, где мало газа и пыли, в том числе и серой. Полученный результат показывает ускоренное расширение Вселенной и наличие тёмной энергии на уровне  $\Omega_\Lambda = 0.66 \pm 0.18$ . Разница между кривой, соответ-

ствующей Вселенной без тёмной энергии, и кривой, аппроксимирующей «чистые» сверхновые, на диаграмме Хаббла составляет  $\sim 1^m$ . Это значение увеличится, если учесть, что в прошлом сверхновые были ярче из-за большей массы сливающихся белых карликов.

Есть основания полагать, что рассмотренный класс сверхновых более однороден. Эти звёзды взорвались в эллиптических галактиках или далеко от центра родительских галактик, следовательно, предшествующие сверхновым звёзды имели схожий химический состав. Кроме того, как было показано в пункте 1.4.2, последние наблюдательные данные по частоте СН Ia находятся в прекрасном согласии со старыми результатами популяционного синтеза двойных звёзд и подтверждают, что подавляющая часть сверхновых типа Ia ( $\sim 99\%$ ) в эллиптических галактиках является результатом слияния белых карликов с общей массой больше Чандрасекаровского предела. Механизм взрыва «чистых» сверхновых — слияние двух белых карликов. Поэтому они показывают более гладкое поведение на диаграмме Хаббла, чем все остальные СН Ia.

Уже проделывались работы по разделению сверхновых по типам галактик, а также по расстоянию от центра родительской галактики, например [148, 149, 150]. Было обнаружено, что дисперсия модуля расстояния на диаграмме Хаббла зависит от типа родительской галактики. Разброс минимален для сверхновых, взорвавшихся в галактиках ранних типов, и максимален для сверхновых, взорвавшихся в галактиках поздних типов и в неправильных галактиках. Сверхновые Ia в галактиках поздних типов в среднем слабее сверхновых в E/S0 галактиках. Разница в абсолютных звёздных величинах для этих сверхновых составляет  $0.14 \pm 0.09^m$  [149]. В спиральных галактиках сверхновые оказались краснее.

Несмотря на большое количество вопросов, связанных с СН Ia, остаётся надеяться, что всё многообразие факторов, влияющих на их блеск, в конечном итоге удастся корректно учесть и тем самым сохранить право называться «стандартными свечами» за этими уникальными объектами природы.

Главным результатом раздела 1.5 является подтверждение ускоренного расширения Вселенной безотносительно химической эволюции и

возможного серого поглощения. Выделенный класс «чистых» сверхновых может быть эффективным инструментом исследования свойств ускоренного расширения Вселенной.

## 2 Поляризация сверхновых звёзд типа Ia и гамма-всплесков

Поляриметрия играет важную роль в современной астрофизике. Поляризационные измерения предоставляют информацию о природе источников излучения, геометрических характеристиках областей излучения, пространственном распределении вещества вокруг источников, магнитных полях.

За два последних десятилетия поляриметрия, а особенно спектрополяриметрия, претерпела существенные улучшения. Были разработаны различные техники измерения поляризации и новые приборы. Быстрые ПЗС-камеры и новые поляризационные материалы сделали поляриметрические наблюдения возможными для большого количества оптических телескопов. В частности, поляризационные измерения важны для короткоживущих или быстропеременных объектов, таких как гамма-всплески и сверхновые звёзды.

Первые поляризационные измерения послесвечения гамма-всплесков были осуществлены на крупных телескопах: 8.2-м одиночные телескопы VLT [151, 152, 153]; 10-м телескоп Кек-I [154], 6.5-м Многозеркальный Телескоп [155]. Примечательно, что первые наблюдения поляризации раннего оптического излучения гамма-всплесков были проведены роботизированным телескопом — 2-м Ливерпульским роботизированным телескопом [156, 157]. Существует также несколько телескопов средних размеров, измеряющих поляризацию гамма-всплесков: 2.56-м Северный Оптический Телескоп [158, 159], 2.2-м телескоп обсерватории Калар-Альто [159], 1.5-м телескоп Каната в обсерватории Хигаши-Хиросима [160] и 1-м USNO телескоп во Флагстафе [159].

Первые попытки измерения поляризации СН Ia были предприняты на 2.6-м рефлекторе Шайна в КраО [161]. Первые спектрополяриметрические данные были получены на 3.9-м Англо-Австралийском Телескопе [162]. Программа поляриметрических наблюдений СН Ia стартовала на 2.1-м Телескопе Струве в обсерватории МакДоналд [163, 164]. Эта программа была продолжена на 8.2-м одиночных телескопах VLT [165]. Спектрополяриметрия также проводилась на 10-м телескопе Кек-1 [166].

## 2.1 Роботизированная сеть МАСТЕР

МАСТЕР — Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов, предназначенная для исследования собственного (синхронного с гамма-излучением) оптического излучения гамма-всплесков, проведения обзора неба с целью обнаружения некаталогизированных объектов и фотометрических исследований по различным программам [20, 21, 22, 23].

Первый робот-телескоп МАСТЕР был установлен в 2002 году около Москвы. В полном объёме российский сегмент сети МАСТЕР заработал в 2010 году с началом использования существенно модернизированных систем МАСТЕР-II, установленных вблизи Благовещенска, Иркутска (пос. Тунка), Екатеринбурга и Кисловодска. На каждой обсерватории сети установлены 40-см двутрубные телескопы (МАСТЕР-II) и широкопольные камеры. Также широкопольные камеры сети МАСТЕР установлены в Аргентине.

Сетью МАСТЕР было проведено более 200 алертных наведений на гамма-всплески. МАСТЕР удерживает первое место в мире по количеству первых наведений на гамма-всплески. Более того, среди всех первых наведений на гамма-всплески наземными телескопами больше половины принадлежит системе МАСТЕР. Открыто более 500 оптических транзиентов, среди них — катаклизмические переменные, сверхновые звёзды<sup>1</sup>, блазары, потенциально опасные астероиды, транзиенты неизвестной природы. Получены фотометрические данные для 387 сверхновых. Поляризационные измерения — это одна из целей при проектировании и создании роботизированной сети МАСТЕР-II. Измерения линейной поляризации сетью МАСТЕР представляют собой одновременные наблюдения объекта несколькими телескопами, оборудованными взаимно перпендикулярными линейными поляроидами. Так как каждый телескоп сети имеет две широкопольные астрономические трубы, для определения параметров Стокса необходимо одновременно навести на объект как минимум 2 телескопа.

МАСТЕР-II — это единственная в мире полностью роботизированная сеть с большим полем зрения, способная измерять поляризацию. В этой

---

<sup>1</sup>Список сверхновых звёзд, открытых или снятых впервые системой МАСТЕР с 2008 года по июнь 2011 см. в Приложении А, за другие года — по ссылке [http://observ.pereplet.ru/sn\\_e.html](http://observ.pereplet.ru/sn_e.html).

работе автор докладывает результаты исследования точности поляризационных наблюдений МАСТЕР и анализирует его способности измерять поляризацию различных типов астрофизических объектов: гамма-всплесков, сверхновых звёзд, блазаров.

## 2.2 Инструменты МАСТЕР и обработка наблюдений

Каждый телескоп системы МАСТЕР-II состоит из двух труб с апертурой 40 см и общим полем зрения 8 квадратных градусов. На каждой трубе установлена ПЗС-матрица с разрешением  $4000 \times 4000$  пикселей, масштабом  $1.85''/\text{пиксел}$ , одинаковые фотометры с *BVRI* фильтрами, представляющими систему Джонсона-Коузина, и поляризационные фильтры. Обе оптические трубы установлены на сверхскоростной монтировке с обратной связью по положению, не требующей дополнительных устройств гидирования в случае экспозиций, не превышающих 3–10 минут. Установка имеет дополнительную степень свободы — изменяемый угол между оптическими осями двух труб. Это позволяет увеличить в два раза поле зрения при обзорных наблюдениях, просто раздвинув трубы, либо проводить синхронную многоцветную фотометрию при сдвинутых трубах. Скорость обзора, которую обеспечивает один комплекс МАСТЕР-II, составляет 128 квадратных градусов в час с пределом до  $20^m$  при тёмном безлунном небе.

Астрометрическая и фотометрическая калибровки производятся стандартным для всех обсерваторий сети МАСТЕР способом [22, 23]. Вычитание байеса (неэкспонированный кадр) и темнового кадра, деление на плоское поле и астрометрическая обработка происходят автоматически. Используются байес и темновые кадры, полученные в вечер перед началом наблюдений, и ближайшие по времени кадры плоского поля, полученные по сумеречному небу. Для перехода от звёздных величин к абсолютным потокам нужно использовать значения нуль-пунктов полос пропускания МАСТЕР (см. Приложение В). Их также можно найти по адресу <http://master.sai.msu.ru/calibration>.

Первыми поляроидами МАСТЕР были высококонтрастные поляризационные плёнки, комбинированные с обычным стеклом (в январе–июле 2011 года вместо стекла использовался *R* фильтр). С июля 2011 года

все поляроиды были заменены на новые широкополосные поляризационные фильтры, изготовленные по технологии линейных проводящих наноструктур [22, 167]. Звёздные величины, полученные в поляризационных фильтрах, примерно соответствуют  $0.2B + 0.8R$ , где  $B, R$  — стандартные фильтры системы Джонсона [23]. Каждая труба оборудована одним поляроидом. На двух трубах одного телескопа плоскости поляризации фильтров ориентированы перпендикулярно. Оси поляроидов ориентированы двумя способами по отношению к небесной сфере: на телескопах МАСТЕР–Кисловодск и МАСТЕР–Тунка оси наклонены под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  к небесному экватору (поляроиды, ориентированные под углами  $45^\circ$  и  $135^\circ$ , были добавлены в Кисловодске в апреле 2012 года); на телескопах МАСТЕР–Благовещенск и МАСТЕР–Урал оси поляроидов наклонены под  $45^\circ$  и  $135^\circ$  к небесному экватору. Таким образом, использование нескольких телескопов системы МАСТЕР позволяет реализовать наблюдения с различно ориентированными поляроидами. Подобная конструкция эффективна для наблюдений быстропротекающих событий со значительной собственной поляризацией излучения. Такие объекты, как правило, имеют внегалактическое происхождение. Несмотря на то что все телескопы системы МАСТЕР имеют одинаковую конструкцию, оптическую схему и поляроиды, присутствуют некоторые различия в отклике каналов. Это ограничивает точность поляризационных измерений. Калибровка по известным галактическим поляризационным стандартам невозможна, поскольку в данном случае любые измерения поляризации включают в себя вычитание ближайших опорных звёзд как минимум с 3-х изображений, полученных на трубах с различно ориентированными поляроидами. Определённая таким образом поляризация объекта получается всегда по отношению к поляризации ближайших звёзд поля. Обычно звёзды поля выбираются из области вокруг источника в радиусе  $10'$  и должны иметь такую же поляризацию из-за схожих свойств межзвёздного вещества в этом направлении. Само по себе звёздное излучение не поляризовано. Поляризация возникает при прохождении света через межзвёздную пыль. Межзвёздная поляризация может достигать высоких значений и сильно зависит от галактических координат и длины волны [168].

Поляризационные измерения МАСТЕР сильнополяризованных внегалактических источников преследуют следующие цели: (1) обнаружить поляризацию, превышающую среднюю поляризацию звёзд Галактики в этом направлении; (2) вычесть дополнительную систематическую поляризацию, имеющую инструментальное происхождение; (3) оценить точность поляризационных измерений системы МАСТЕР.

Для калибровки каналов необходимы звёзды с нулевой поляризацией. Предполагается, что поляризация света звёзд в поле зрения мала. Это может быть проверено с помощью закона Серковского [169]. Разница в звёздных величинах между двумя трубами, усреднённая по всем опорным звёздам, даёт поправку, учитывающую различные отклики каналов для разных телескопов сети.

Электромагнитное излучение может быть описано в терминах параметров Стокса:  $I$  (полная интенсивность),  $Q$ ,  $U$  (для описания линейной поляризации),  $V$  (для описания круговой поляризации). Степень линейной поляризации  $P$  и поляризационного угла  $\theta$  может быть выражена с помощью параметров Стокса как  $P = \frac{\sqrt{Q^2+U^2}}{I}$ ,  $\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}$ . Одноточные безразмерные параметры Стокса — это нижняя граница степени линейной поляризации, иначе говоря, значение  $P$  может быть положительным, даже если один из параметров Стокса ( $\frac{I_1-I_2}{I_1+I_2}$ ) равен нулю с некоторой неопределённостью. Проблема вероятностных оценок степени линейной поляризации из наблюдений с двумя поляроидами рассмотрена в приложении работы [170].

## 2.3 Калибровка поляроидов по блазарам

Из-за уравнивания труб с различно ориентированными поляроидами по звёздам поля МАСТЕР не может использовать стандартные поляризованные и неполяризованные звёздные источники для калибровки. Блазары — хорошие кандидаты для калибровки степени поляризации и поляризационного угла МАСТЕР. Степень поляризации и яркость блазаров может достигать очень высоких значений в периоды их активности. Важно, что блазары имеют собственную поляризацию, которая не может быть «уничтожена» при уравнивании труб по звёздам сравнения. С другой стороны, блазары — это переменные объекты. Для калибровки

Таблица 2.1: Список наблюдений блазаров сетью МАСТЕР в 2012–2013 годах. К – Кисловодск, КБ – Кисловодск и Благовещенск.

Объект	JD	Экват. коорд.	$P_{real}$	$\theta(^{\circ})$	$P_{ISP}$
87GB 165943.2+395846	2456046.5	$17^h 01^m 24^s .635$ $+39^{\circ} 54' 37'' .09$	$8 \pm 7$	$137 \pm 10$	0.25
QSO B1215+303	2456047.5	$12^h 17^m 52^s .082$ $+30^{\circ} 07' 00'' .64$	$4 \pm 2$	$160 \pm 13$	0.2
OC 457 (К)	2456331	$01^h 36^m 58^s .595$ $+47^{\circ} 51' 29'' .10$	$21 \pm 2$	$87 \pm 5$	1.2
OC 457 (КБ)	2456331	$01^h 36^m 58^s .595$ $+47^{\circ} 51' 29'' .10$	$22 \pm 2$	$92 \pm 4$	1.2
ЗС 454.3	2456561.5	$22^h 53^m 57^s .748$ $+16^{\circ} 08' 53'' .56$	$34 \pm 2$	$13 \pm 3$	0.8

необходимо иметь независимые поляриметрические данные, полученные другими телескопами в этот же момент времени.

Наблюдения блазаров сетью телескопов-роботов МАСТЕР представлены в Таблице 2.3. Для двух из них, OC 457 и ЗС 454.3, была обнаружена значительная степень поляризации. Для учёта систематической ошибки определения доли поляризованного излучения в случае низкого отношения сигнал/шум использовалась традиционная статистическая поправка  $P_{real} = \sqrt{P^2 - (\sigma_P)^2}$  [171]. Окончательные ошибки степени поляризации  $P_{real}$  и поляризационного угла  $\theta$  включали дисперсию соответствующих величин для звёзд поля. Межзвёздная поляризация  $P_{ISP}$  рассчитывалась с использованием эмпирического закона  $P_{ISP} \leq 9E(B - V)$  [169, 101]. Во всех случаях значение было  $P_{ISP}$  было меньше дисперсии степени поляризации звёзд поля.

### 2.3.1 Блазар OC 457

В начале 2013 года возросла активность блазара OC 457. По сравнению с предыдущими наблюдениями его яркость в фильтре  $R$  увеличилась в 50 раз [172]. Красное смещение объекта  $z = 0.859$  [173]. Системой МАСТЕР были проведены поляризационные наблюдения OC 457 с 4 по 7 февраля в Кисловодске и Благовещенске. В это время средняя звёздная величина объекта составляла  $15.5^m$  в белом свете ( $0.2B + 0.8R$ ). QU–

диаграмма за 7 февраля показана на Рис. 2.1. Используя измерения при 4-х различных ориентациях поляроида, можно найти долю поляризованного света по отношению к полному потоку для каждой ориентации поляроида. Отношение разницы в потоках с поляроидом и без ( $\Delta f$ ) к полному потоку ( $f$ ) показано на Рис. 2.2. Аппроксимация методом  $\chi^2$  даёт степень поляризации и поляризационный угол. Было получено высокое значение поляризации:  $P = (21 \pm 2)\%$ ,  $\theta = (87 \pm 5)^\circ$ .

### 2.3.2 Блазар 3C 454.3

24-го сентября Ларионов и Ефимова [174] сообщили о начале активности блазара 3C 454.3. Система МАСТЕР наблюдала этот объект в ночь с 25 на 26 сентября в Кисловодске в 4-х поляроидах. Звёздная величина объекта составила  $14^m$  в белом свете. Степень поляризации была очень высокой  $P = (34 \pm 2)\%$ . QU-диаграмма и отношение разницы в потоках с поляроидом и без ( $\Delta f$ ) к полному потоку ( $f$ ) показаны на Рис. 2.3 и 2.4.

### 2.3.3 Блазары 87GB165943.2 +395846 и QSO B1215 +303

Для объектов 87GB 165943.2 +395846 и QSO B1215 +303 степень поляризации на момент наблюдения составила  $P = (8 \pm 7)\%$  и  $(4 \pm 2)\%$  соответственно (Рис. 2.5, 2.6). В ночь наблюдений объект 87GB 165943.2 +395846 был слабее  $17^m$  в белом свете, а звёздная величина объекта QSO B1215 +303 была  $\sim 15^m$  в белом свете. Очевидно, оба блазара находились в спокойном состоянии.

Полученные результаты показывают, что поляроиды системы МАСТЕР позволяют измерять высокую степень поляризации ярких объектов ( $< 16^m$ ). Степень линейной поляризации и угла поляризации блазаров ОС 457 и 3C 454.3 согласуются с результатами, полученными Ларионовым и др. [175] и с данными виртуальной обсерватории Лаборатории Наблюдательной Астрофизики Астрономического института им. В.В. Соболева<sup>1</sup> в те же дни наблюдений.

---

<sup>1</sup><http://lacerta.astro.spbu.ru/program.html>.

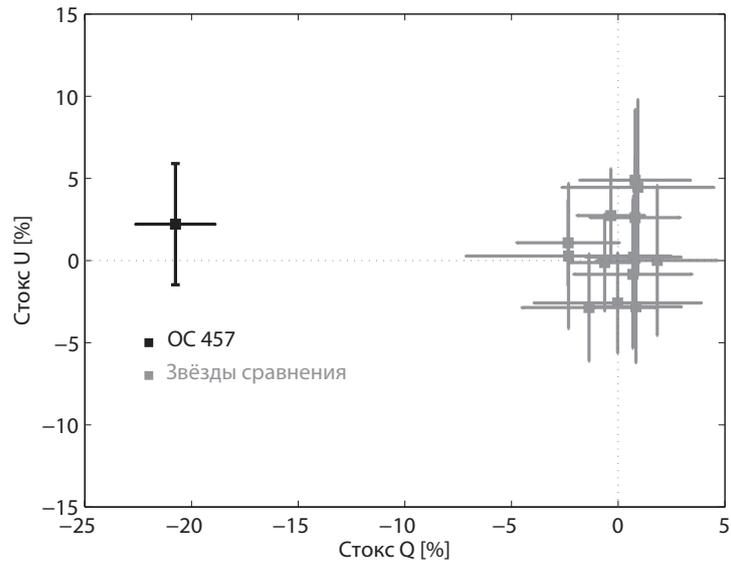


Рис. 2.1: QU–диаграмма для блазара OC 457 (чёрные точки) и для звёзд сравнения (серые точки). Наблюдения проводились телескопом МАСТЕР–Кисловодск 7 февраля 2013 года.

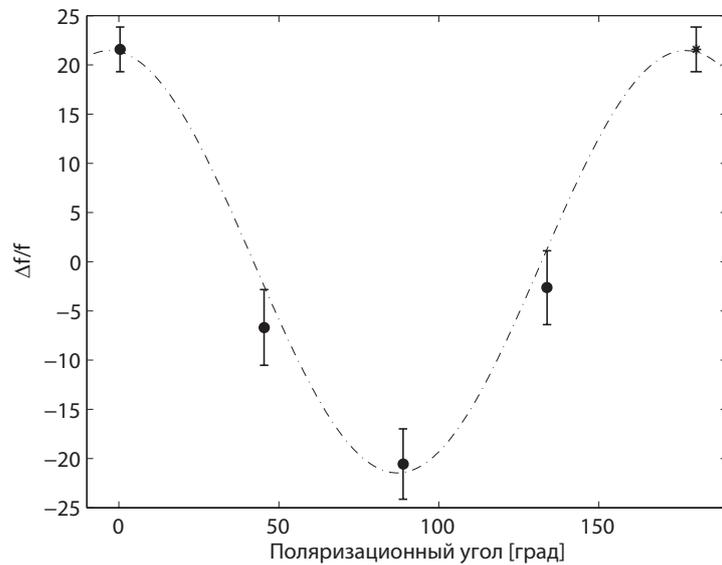


Рис. 2.2: Отношение разницы в потоках с поляроидом и без ( $\Delta f$ ) к полному потоку ( $f$ ) для блазара OC 457. МАСТЕР–Кисловодск. Точка на  $\theta = 0^\circ$  является повторением  $\theta = 180^\circ$ . Пунктирная кривая — аппроксимация методом  $\chi^2$ .

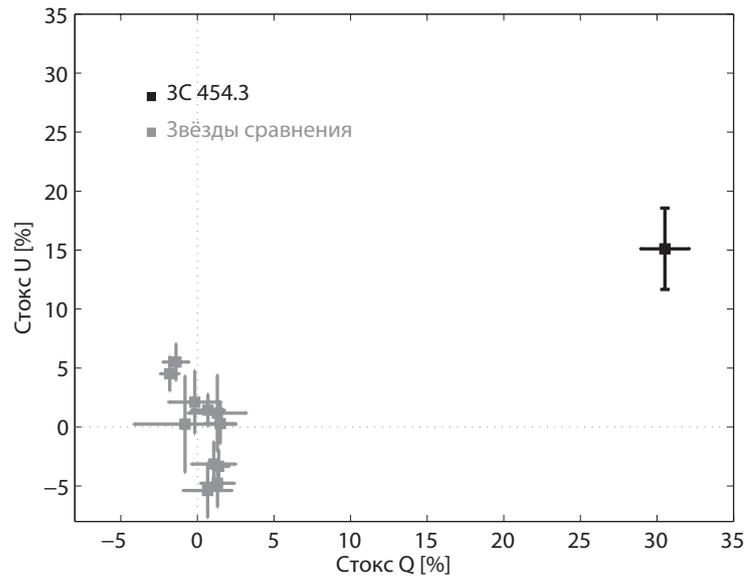


Рис. 2.3: QU–диаграмма для блазара 3C 454.3 (чёрные точки) и для звёзд сравнения (серые точки). Наблюдения проводились телескопом МАСТЕР–Кисловодск.

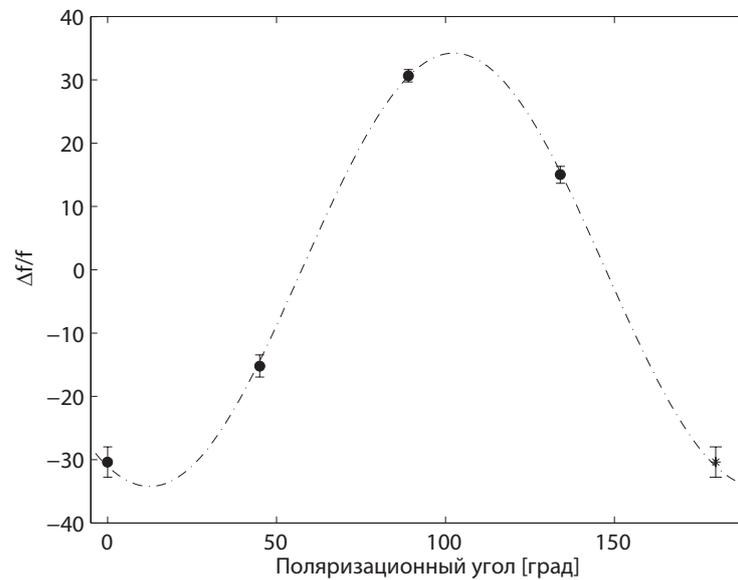


Рис. 2.4: Отношение разницы в потоках с поляроидом и без ( $\Delta f$ ) к полному потоку ( $f$ ) для блазара 3C 454.3. МАСТЕР–Кисловодск. Точка на  $\theta = 0^\circ$  является повторением  $\theta = 180^\circ$ . Пунктирная кривая — аппроксимация методом  $\chi^2$ .

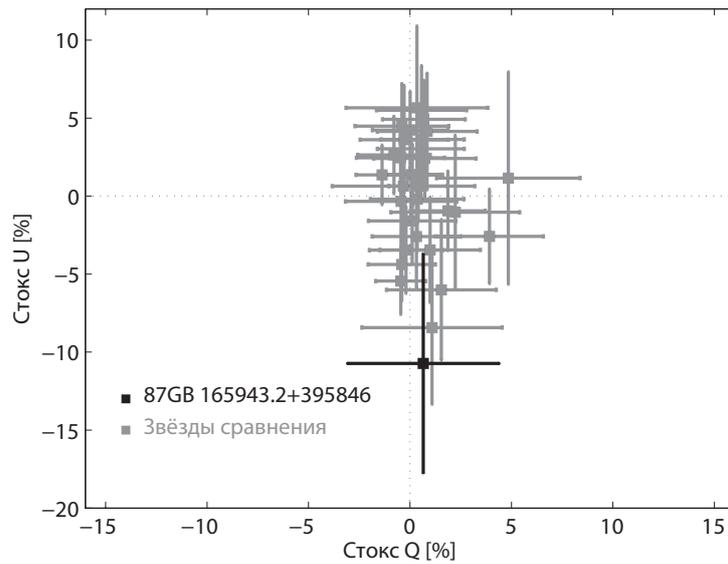


Рис. 2.5: QU–диаграмма для блазара 87GB 165943.2 +395846 (чёрные точки) и для звёзд сравнения (серые точки). Наблюдения проводились телескопом МАСТЕР–Кисловодск.

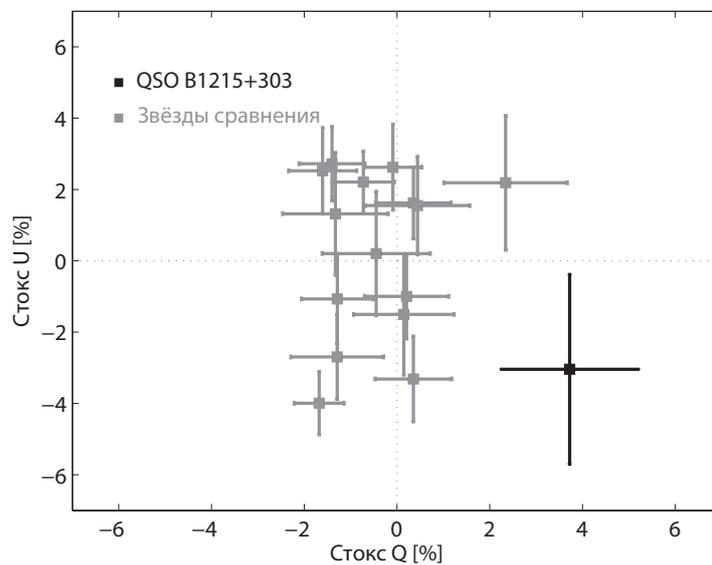


Рис. 2.6: QU–диаграмма для блазара QSO B1215+303 (чёрные точки) и для звёзд сравнения (серые точки). Наблюдения проводились телескопом МАСТЕР–Кисловодск.

## 2.4 Поляризация сверхновых звёзд типа Ia

### 2.4.1 Наблюдения поляризации СН Ia

Наблюдение далёких сверхновых звёзд типа Ia привело к открытию ускоренного расширения Вселенной [5]. Однако ряд вопросов, касающихся физических механизмов взрыва, всё ещё не решён. Среди главных моделей взрыва СН Ia обсуждаются в основном два: слияние двух белых карликов [120, 121] и механизм Шацмана, согласно которому взрыв является результатом аккреции вещества на белый карлик со звезды-компаньона в двойной системе [119]. В первом случае, который чаще реализуется в эллиптических галактиках [27], удельный вращательный момент намного выше, чем во втором, что могло бы привести к анизотропии взрыва и несимметричному сбросу оболочки. Как следствие можно было бы ожидать значительную поляризацию в оптическом излучении сверхновой [176]. Таким образом, регистрация значительной ( $> 2\%$ ) поляризации может быть независимым аргументом в пользу модели сливающихся белых карликов. Следует заметить, что поляризация в континууме связана с геометрией взрыва, а линейная поляризация — с распределением вещества вокруг сверхновой [177].

Преыдушие наблюдения СН Ia показали близкое к нулю значение поляризации в континууме и небольшую поляризацию в линиях  $\sim 1\%$ . Если поляризация в континууме и наблюдается, то её значение мало: например, поляризация СН 1999by (СН Ia типа -91bg) составила 0.3–0.8% [164], а СН 2005hk —  $\sim 0.4\%$  [166].

СН 1996X была первой сверхновой типа Ia, для которой были проведены спектрополяриметрические наблюдения до оптического максимума. Широкополосная поляриметрия показала, что поляризация в континууме равна нулю. Сспектрополяриметрия выявила наличие спектральных особенностей с довольно низким уровнем поляризации  $\sim 0.3\%$  [178].

Очень важно измерять поляризацию до оптического максимума, пока оболочка не успела значительно расшириться. Степень поляризации СН Ia на поздних стадиях не велика. Например, в работе [179] представлены спектрополяриметрические наблюдения СН 1997dt спустя 21 день после оптического максимума. Поляризации обнаружено не было,

но несущественная поляризация наблюдалась в линиях FeII и SiII. Другим примером является SN 2001el [180]. До оптического максимума линейная поляризация в континууме составляла  $\sim 0.2\text{--}0.3\%$ . В течение следующих 10 дней после максимума степень поляризации в континууме и линиях резко снизилась, а через  $\sim 19$  дней совсем исчезла. Спектрополяриметрия SN 2004S, полученная через 9 дней после максимума блеска, дала очень низкую степень поляризации [181]. Отсутствие поляризации на поздних стадиях подчёркивает важность ранних поляриметрических наблюдений.

Существенная поляризация в линиях была обнаружена у SN 2004dt, для которой были получены данные примерно за 7 дней до максимума [182] и через 4 дня после [179]. В течение этого периода поляризация в линии SiII менялась в пределах  $\sim 2\%$ . Измерения поляризации SN 2002bf приблизительно в том же временном интервале, что и для SN 2004dt, показали  $\sim 2\%$  поляризацию в линии CaII [179]. SN 1997br и SN 2002bo также показали  $1\text{--}2\%$  поляризацию в линиях [182].

Межзвёздная поляризация в Галактике или в родительских галактиках сверхновых затрудняет определение собственной поляризации сверхновой. Межзвёздную поляризацию оценивают с помощью эмпирического закона Серковского [183]. Но поскольку этот закон был выведен на основе наблюдений в нашей Галактике, то нельзя с уверенностью утверждать, что распределение и структура пыли в родительских галактиках сверхновых выглядит таким же образом. Величина межзвёздной поляризации может быть довольно высокой. К примеру, поляризация для SN 2006X, неисправленная за межзвёздную поляризацию, линейно спадала вдоль спектра от  $8\%$  на  $4000 \text{ \AA}$  до  $\sim 2\%$  на  $8000 \text{ \AA}$  [184]. После учёта межзвёздной поляризации остаточная поляризация в линии CaII IR и линии SiII составила  $\sim 1.5\%$  и  $\sim 0.5\%$  соответственно (10 дней до максимума блеска).

## 2.4.2 SN 2012bh

Сверхновых Ia, открытых до максимума блеска, не много, а тех из них, для которых получены спектрополяриметрические и/или поляриметрические наблюдения, ещё меньше. SN 2012bh — хороший пример

СН Ia, открытой до максимума блеска. Эта сверхновая вспыхнула в Sb галактике UGC 7228 и была обнаружена в обзоре Pan-STARRS1 Medium Deep Survey 11.50 ВВ<sup>1</sup> марта 2012 года [185, 186, 187]. Координаты сверхновой  $\alpha = 12^h 13^m 37^s .309$ ,  $\delta = +46^\circ 29' 00'' .48$  (J2000.0). В момент открытия звёздная величина объекта составляла  $z_{p1} = 22.8^m(AB)$ , но уже 21.47 ВВ марта она была  $i_{p1} = 16.99^m$  [186]. Спектр в диапазоне 480–940 нм был получен 15 марта с помощью Большого Канарского Телескопа. Оказалось, что СН 2012bh принадлежит к молодым «нормальным» СН Ia. Другой спектр в диапазоне 350–740 нм был получен 23 марта на 1.5-м телескопе Обсерватории Уиппла, Аризона. Совместная обработка двух спектров показала, что сверхновая была обнаружена за три недели до максимума блеска.

Поляриметрические наблюдения СН 2012bh осуществлялись системой МАСТЕР в Тунке, Кисловодске и Благовещенске до и после максимума блеска, с 27 марта по 15 апреля. Изображение сверхновой, полученное телескопом МАСТЕР–Тунка, представлено на Рис. 2.7, результаты фотометрии — в таблице 2.2.

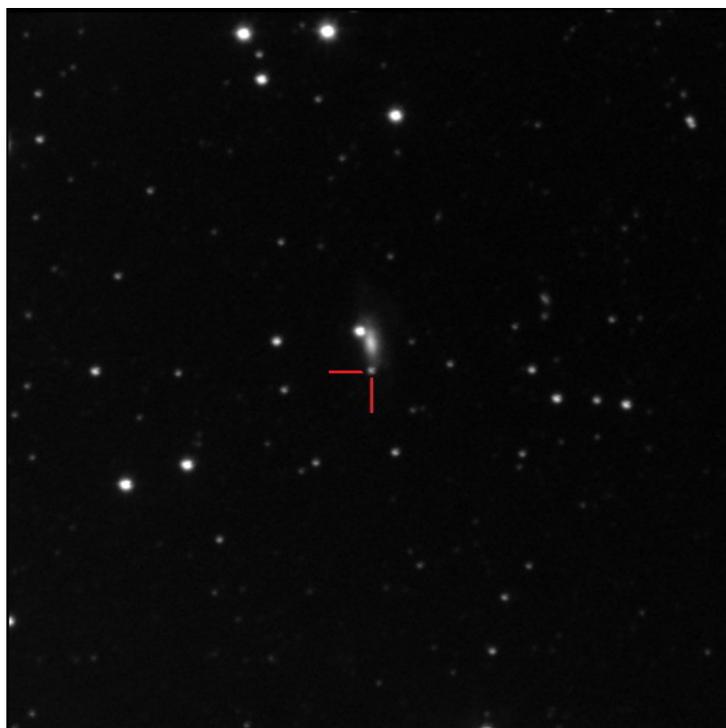


Рис. 2.7: Сверхновая 2012bh. Наблюдалась телескопом МАСТЕР–Тунка 1 апреля 2012 года.

---

<sup>1</sup>Всемирное время.

Таблица 2.2: Результаты фотометрии МАСТЕР для СН 2012bh.  $P_W, P_E$  обозначают западную и восточную трубы телескопов.

JD	Тунка				Благовещенск				Кисловодск			
	$m_{PE}$	$\sigma_{PE}$	$m_{PW}$	$\sigma_{PW}$	$m_{PW}$	$\sigma_{PW}$	$m_{PE}$	$\sigma_{PE}$	$m_{PW}$	$\sigma_{PW}$	$m_{PE}$	$\sigma_{PE}$
2456014	—	—	—	—	—	—	15.80	0.04	—	—	—	—
2456015	15.77	0.06	15.70	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
2456018	—	—	—	—	15.78	0.03	15.74	0.04	—	—	—	—
2456019	15.80	0.05	15.80	0.07	15.77	0.02	15.79	0.02	15.92	0.10	15.82	0.04
2456020	15.81	0.04	—	—	15.86	0.07	15.81	0.02	—	—	—	—
2456021	—	—	—	—	—	—	15.86	0.04	—	—	—	—
2456022	15.91	0.07	15.98	0.10	15.92	0.03	—	—	15.97	0.07	15.92	0.05
2456023	15.94	0.04	—	—	15.94	0.04	—	—	—	—	—	—
2456024	—	—	—	—	16.20	0.04	—	—	—	—	—	—
2456025	16.09	0.04	16.13	0.07	—	—	—	—	16.26	0.08	—	—
2456026	—	—	—	—	—	—	—	—	16.26	0.10	—	—
2456027	16.24	0.08	16.16	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
2456029	16.37	0.08	16.34	0.08	—	—	—	—	—	—	16.34	0.06
2456030	—	—	—	—	—	—	—	—	16.40	0.04	—	—
2456031	—	—	—	—	—	—	—	—	16.53	0.04	—	—
2456033	16.74	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Сведённая кривая блеска представлена на Рис. 2.8. Для сравнения нанесена также кривая блеска в поляроиде «нормальной» СН Ia 1994D, которая была получена из её кривых блеска в  $B$  и  $R$  фильтрах [188] с помощью соотношения  $0.2B + 0.8R$ . В предположении, что СН 2012bh является «нормальной» СН Ia, её кривая блеска наилучшим образом описывается кривой блеска СН 1994D с параметрами:  $T_{max} = 2456017.865$  (31 марта),  $m_{max} = 15.75^m$ .

Информация о поляризации звёзд в окрестностях СН 2012bh отсутствует. Предположение о малой межзвёздной поляризации довольно правдоподобно. Сверхновая расположена в  $70^\circ$  над Галактическим экватором, а поглощение в этом направлении мало [189, 190]. Данные [191] указывают, что межзвёздная поляризация не превышает 1%. Более того, на основании закона Серковского по избытку цвета в этом направлении находим, что  $P_{ISP} \leq 9E(B - V) = 0.12\%$  [169, 101].

Была посчитана степень поляризации в разные ночи для двух пар поляроидов: Благовещенск–Тунка и Благовещенск–Кисловодск. В обоих случаях для каждой ночи значение поляризации было близко к нулю. Данные были усреднены по всем дням для каждой пары поляроидов, после чего два полученных набора данных также были усредне-

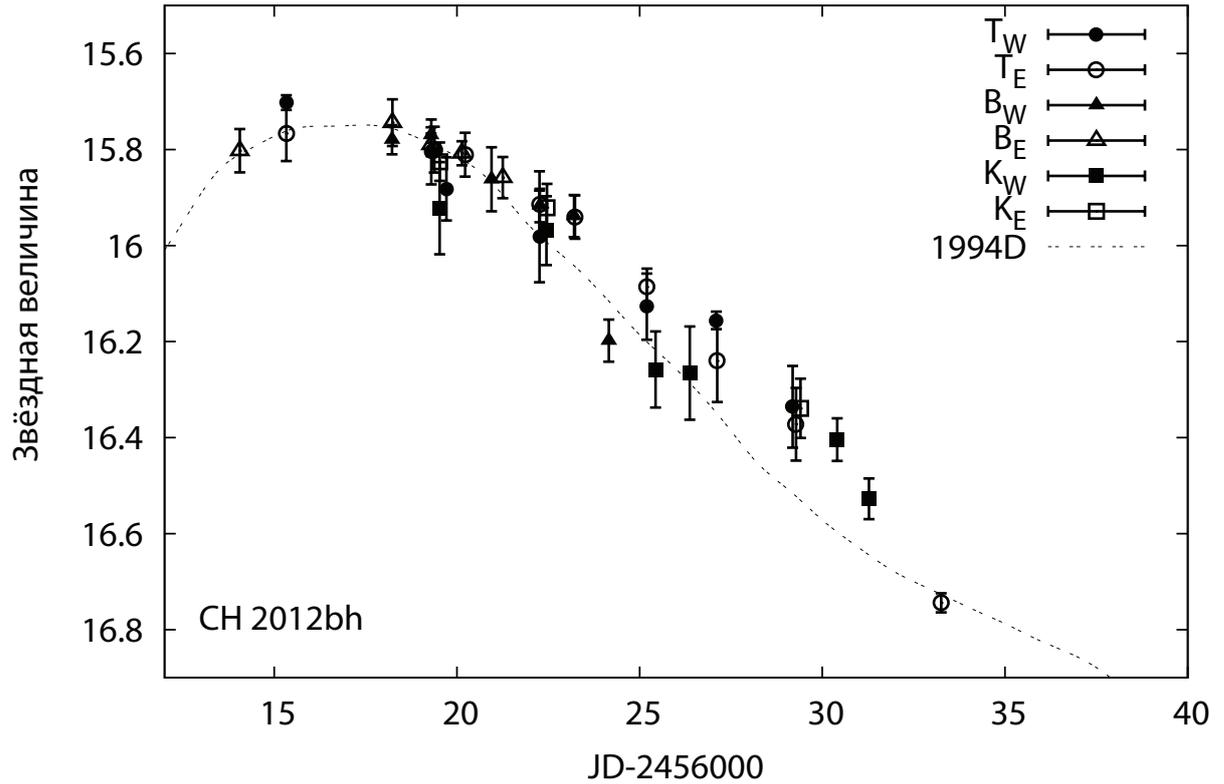


Рис. 2.8: Кривая блеска SN 2012bh, полученная сетью МАСТЕР. Данные обсерватории Тунки показаны кружками; Благовещенска — треугольниками; Кисловодска — квадратами. Закрашенные и незакрашенные значки соответствуют разным трубам со взаимно перпендикулярными поляроидами (W — западная, E — восточная). Пунктирная кривая — наложенная кривая блеска SN 1994D.

ны. В результате  $1-\sigma$  верхний предел на степень линейной поляризации SN 2012bh составил 3%. QU-диаграмма, построенная для пары поляроидов Благовещенск–Тунка, представлена на Рис. 2.9.

## 2.5 Поляризация гамма-всплесков

### 2.5.1 Наблюдения поляризации гамма-всплесков

Гамма-всплески — самые мощные взрывы во Вселенной. К сожалению, физика процесса до сих пор полностью не ясна. Изучение гамма-всплесков осложняется тем, что они являются короткоживущими событиями. Спектральные исследования указывают на синхротронную природу излучения гамма-всплесков. Известно, что синхротронное излучение в упорядоченном магнитном поле поляризовано. Таким образом, на-

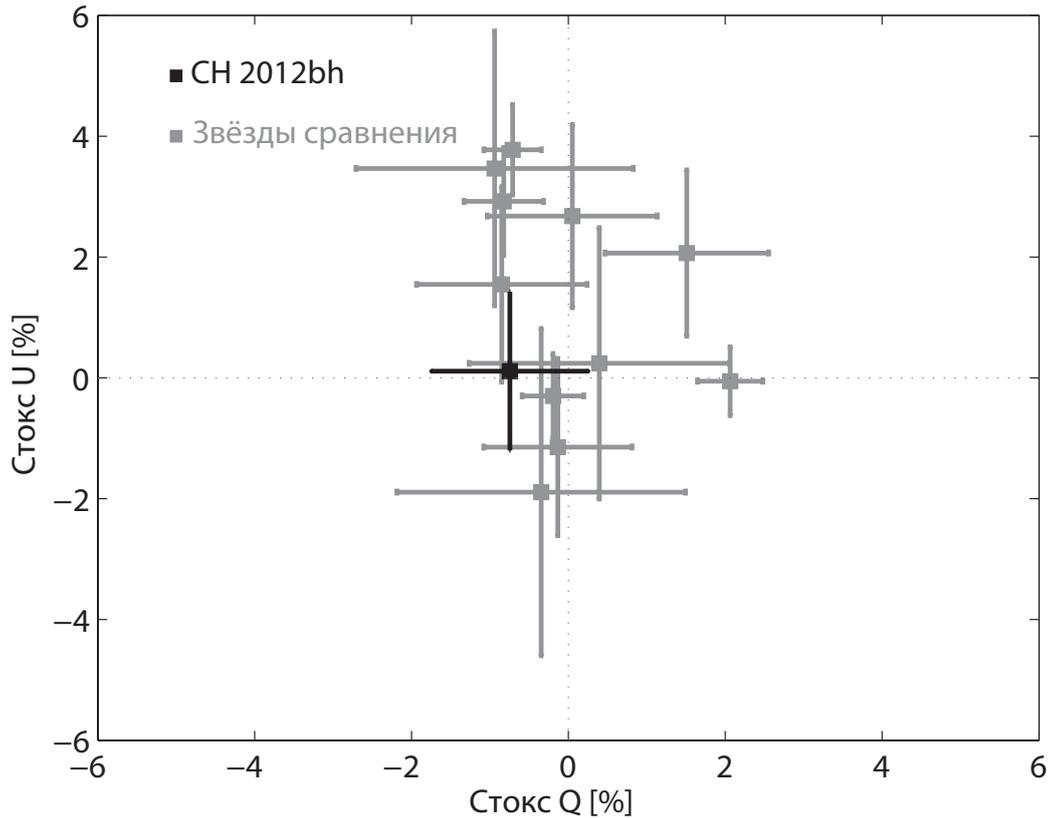


Рис. 2.9: QU–диаграмма для SN 2012bh (чёрные точки) и звёзд сравнения (серые точки). Усреднённые за всё время наблюдений параметры Стокса получены для пары поляридов Благовещенск–Тунка.

блюдаемая поляризация зависит от степени когерентности магнитного поля и от геометрических характеристик излучающей области. Теоретические модели, подразумевающие упорядоченное магнитное поле, предсказывают поляризацию в 20–30% [192]. Проверка этого предсказания является сложной и интересной задачей, так как гамма-всплески — быстропеременные объекты с характерными временами жизни десятки секунд.

Излучение гамма-всплесков обычно подразделяют на собственное излучение и послесвечение. Собственное излучение гамма-всплеска состоит из гамма-излучения и менее энергичного излучения, возникающего одновременно с ним. Это излучение включается в себя рентгеновское излучение, которое обыкновенно сопровождает гамма-излучение как хвост в распределении по энергиям. Собственное излучение также содержит оптическую и радио составляющие, зарегистрировать которые значительно сложнее. За гамма-излучением следует излучение на более длинных волнах — послесвечение. Оно появляется в рентгеновском, ультрафиоле-

товом, оптическом, инфракрасном и радио диапазонах и может длиться от нескольких часов до недель, иногда месяцев и даже лет. Считается, что послесвечение возникает из-за взаимодействия гамма-всплеска со средой. В зависимости от того, сколько времени прошло с момента самого гамма-всплеска оптическое излучение гамма-всплеска формально можно разделить на собственное оптическое излучение, раннее оптическое излучение и послесвечение. Исторически, оптические наблюдения гамма-всплесков развивались от наблюдений послесвечения к наблюдению собственного оптического излучения.

На сегодняшний день не существует надёжных поляризационных наблюдений собственного оптического излучения гамма-всплесков. Существует только несколько измерений поляризации послесвечения, обычно на уровне 1–3%. Это: GRB 990510 с поляризацией на уровне  $(1.7 \pm 0.2)\%$  в момент  $980T_{90}$  [151]; GRB 020813 с поляризацией от 2% ( $640\text{--}1140T_{90}$ ) до 0.8% ( $3300\text{--}3570T_{90}$ ) [154, 153]; GRB 021004 с поляризацией около 1–2% в момент  $t > 500T_{90}$  [193] и GRB 030329 с поляризацией 0.3–2.5% ( $t > 1700T_{90}$ ) [159]<sup>1</sup>. Исключением является гамма-всплеск GRB 020405, для которого была обнаружена значительная поляризация  $(9.9 \pm 1.3)\%$  через 1.3 дня после обнаружения гамма-всплеска [155]. Однако этот результат не подтвердился измерениями других групп, которые получили  $(1.5 \pm 0.4)\%$  (1.2 дня после гамма-всплеска) [194],  $(1.96 \pm 0.33)\%$  и  $(1.47 \pm 0.43)\%$  (2.2 и 3.25 дней после гамма-всплеска) [193].

Во время послесвечения можно изучать физические параметры релятивистской головной ударной волны, расширяющейся в окружающую среду. Характерные времена, на которых меняется степень поляризации, могут помочь отделить собственную поляризацию гамма-всплеска от поляризации, вызванной межзвёздной средой [195]. Разрушение пыли вблизи гамма-всплеска сильным полем излучения [196, 197] приводит к монотонному уменьшению степени поляризации при постоянном угле поляризации [159]. При малых значениях поляризации анализ затруднён, и отличие собственной поляризации гамма-всплеска от поляризации, вы-

---

<sup>1</sup> $T_{90}$  — время, характеризующее продолжительность гамма-всплесков (за которое выделилось 90% энергии всплеска). Значения  $T_{90}$  для конкретных всплесков могут быть найдены в цитируемых статьях.

званной межзвёздной средой в Млечном Пути и родительской галактике, является модельно-зависимым.

Много усилий было приложено для проведения ранних оптических наблюдений, когда ещё ожидается поляризация излучения самого гамма-всплеска. Можно предложить два варианта происхождения раннего оптического излучения: от головной ударной волны или от обратной ударной волны [198, 199]. Ожидается, что в последнем случае измерения поляризации более явно выявят структуру внутреннего магнитного поля.

На переднем крае головной ударной волны домены когерентного магнитного поля могут генерироваться стохастически. В теоретической модели Грузинова и Ваксмана [200] ожидается, что верхний предел на степень поляризации в данном случае составляет 10%. Поляризация предсказывается также в моделях, рассматривающих синхротронное излучение джета, наблюдаемого не вдоль оси симметрии, даже в случае, если магнитные поля имеют сложную неупорядоченную структуру (см. ссылки в обзоре [195]). К сожалению, до сих пор теоретически предсказанное наличие поляризации не было однозначно обнаружено в наблюдениях, что, возможно, говорит о чрезмерной простоте используемых моделей джетов.

Существует несколько наблюдений поляризации раннего оптического излучения. Для гамма-всплеска GRB 060218 Манделл и др. [156] сообщают о верхнем пределе в 8% на временах, соответствующих нарастанию головной ударной волны, основываясь на наблюдении с 30-секундной экспозицией с момента  $2T_{90}$ . Гамма-всплеск GRB 090102 [157] показал 10% поляризацию раннего оптического излучения (одна 60-секундная экспозиция, начиная с  $6T_{90}$ ). Излучение в этот момент было проинтерпретировано как излучение обратной ударной волны. Оба измерения поляризации были получены с помощью вращающегося поляроида 2-м Ливерпульского роботизированного телескопа. Гамма-всплеск GRB 091208B [160] показал 10% поляризацию на временах  $10\text{--}50T_{90}$  в оптическом излучении, проинтерпретированном как раннее послесвечение (излучение головной ударной волны). Измерения проводились с помощью 1.5-м телескопа Хигаши-Хиросима.

Наблюдения собственного оптического излучения могут пролить свет на другую физику, более тесно связанную с работой центральной машины — на структуру магнитного поля вблизи самого выброса. Собственное оптическое излучение гамма-всплеска предположительно возникает из-за взаимодействия вещества джета с самим собой. Магнитные поля могут быть перенесены из центральной машины. Если выброс управляется преимущественно электромагнитным полем, то в течение первых 10 минут степень поляризации может быть  $> 40\%$  [160].

Положительная поляризация собственного излучения гамма-всплеска пока была зарегистрирована только в гамма-диапазоне. Было заявлено, что собственное гамма-излучение GRB 021206 поляризовано на 80%, позднее это утверждение было подвергнуто критике (см. [195]). Ещё несколько гамма-всплесков показали линейную поляризацию собственного гамма-излучения на уровне 20–80%: GRB 041219 [201], GRB 100826A [202], и, недавно, GRB 110301A и GRB 110721A [203]. Хотелось бы подчеркнуть, что именно в момент, когда оптическая вспышка наблюдается одновременно с гамма-излучением, обнаружение поляризации оптической компоненты является чрезвычайно важным для понимания физики джета. Если поляризация возникает из-за обратной ударной волны, становится возможным изучение внутренних магнитных полей.

Роботизированная сеть МАСТЕР была спроектирована с целью максимально быстрого получения информации о поляризации гамма-всплесков. Одновременное наведение на объект двумя телескопами сети позволяет определить степень линейной поляризации и угол поляризации. Более 200 наблюдений гамма-всплесков были проведены сетью МАСТЕР, оптическое излучение обнаружено для 16 гамма-всплесков.

## 2.5.2 GRB 121011A

Гамма-всплеск GRB 121011A заслуживает особого внимания из-за того, что его наблюдение в оптическом диапазоне началось одновременно с гамма-излучением<sup>1</sup>. Гамма-всплеск GRB 121011A [204, 205, 206] наблюдался двумя обсерваториями сети МАСТЕР [207, 208, 209]. Рабо-

---

<sup>1</sup>То есть время начала наблюдений на телескопах МАСТЕР меньше  $T_{90} = 75.6$  секунд ([http://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb\\_table/](http://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/)).

тизированный телескоп, расположенный в Благовещенске, навёлся на GRB 121011A спустя 51 секунду после времени  $T_0$ <sup>1</sup> в двух поляризациях. Телескоп в Тунке навёлся на объект спустя 106 секунд после  $T_0$ , также в двух поляризациях. Таким образом, наблюдения начались в четырёх различных поляризациях. К сожалению, в Тунке были не самые лучшие погодные условия. Первый снимок из Тунки, на котором было обнаружено оптическое излучение, был получен спустя 230 секунд после времени  $T_0$ . Обсерваторией МАСТЕР–Благовещенск оптические наблюдения продолжались около часа. Кривая блеска показана на Рис. 2.10, фотометрия представлена в Табл. 2.3.

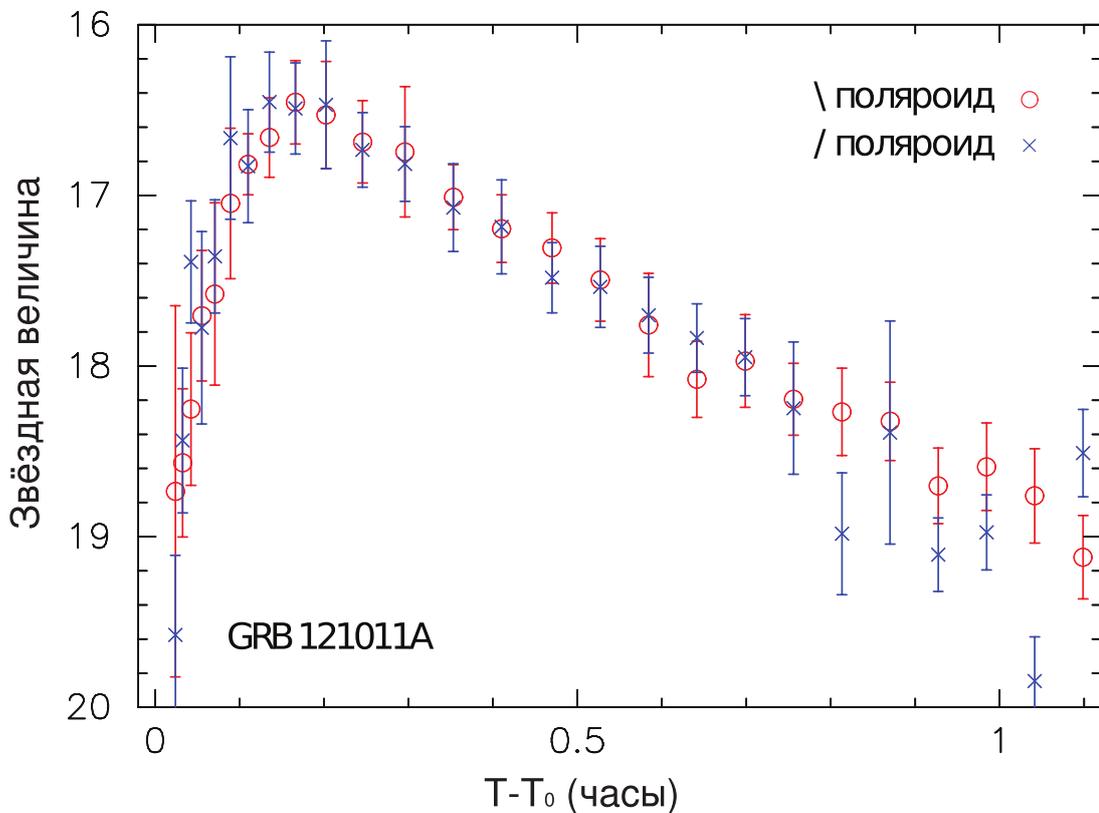


Рис. 2.10: Кривая блеска GRB 121011A во взаимно перпендикулярных поляризидах, полученная телескопом МАСТЕР–Благовещенск.

<sup>1</sup> $T_0$  (trigger time) — момент, когда гамма-всплеск был зарегистрирован космической обсерваторией.

Таблица 2.3: Оптические наблюдения GRB 121011A во взаимно перпендикулярных поляроидах на телескопе МАСТЕР–Благовеценск. Абсолютные потоки могут быть вычислены с использованием нуль-пунктов из приложения В.

$T - T_0$ (ч)	Экспозиция (с)	P\<	$\sigma_{P\setminus}$	P/	$\sigma_{P/}$
0.0240	20	19.6	0.5	18.7	1.1
0.0326	20	18.4	0.4	18.6	0.4
0.0426	30	17.4	0.4	18.3	0.4
0.0553	40	17.8	0.6	17.7	0.4
0.0708	50	17.4	0.3	17.6	0.5
0.0892	60	16.7	0.5	17.0	0.4
0.1102	70	16.8	0.3	16.8	0.2
0.1354	90	16.5	0.3	16.7	0.2
0.1662	110	16.5	0.3	16.5	0.2
0.2024	130	16.5	0.4	16.5	0.3
0.2457	160	16.7	0.2	16.7	0.2
0.2959	180	16.8	0.2	16.7	0.4
0.3531	180	17.1	0.3	17.0	0.2
0.4103	180	17.2	0.3	17.2	0.2
0.4701	180	17.5	0.2	17.3	0.2
0.5272	180	17.5	0.2	17.5	0.2
0.5843	180	17.7	0.2	17.8	0.3
0.6416	180	17.8	0.2	18.1	0.2
0.6987	180	17.9	0.2	18.0	0.3
0.7560	180	18.2	0.4	18.2	0.2
0.8133	180	19.0	0.4	18.3	0.3
0.8703	180	18.4	0.7	18.3	0.2
0.9273	180	19.1	0.2	18.7	0.2
0.9845	180	19.0	0.2	18.6	0.3
1.0416	180	19.8	0.3	18.8	0.3
1.0989	180	18.5	0.3	19.1	0.2

1.1562	180	19.0	0.3	18.4	0.4
1.2134	180	18.2	0.3	19.0	0.1
1.2706	180	19.5	0.3	18.8	0.3
1.3277	180	19.7	0.2	19.2	0.2
1.3848	180	18.7	0.3	18.5	0.2
1.4421	180	21.4	0.5	19.5	0.3
1.4996	180	19.2	0.3	19.4	0.3
1.5566	180	19.3	0.3	19.1	0.2
1.6139	180	19.5	0.7	20.2	0.3
1.6711	180	18.9	0.3	19.1	0.3
1.7854	180	21.2	0.3	19.0	0.2
1.9324	180	18.9	0.3	21.6	0.4
2.0145	180	19.8	0.4	20.5	0.3
2.0717	180	21.1	0.3	19.9	0.3
2.1289	180	20.9	0.2	19.6	0.3
2.1861	180	20.5	0.3	21.9	0.3
2.2434	180	19.6	0.5	23.5	0.3
2.3008	180	21.0	0.6	19.9	0.3
2.4152	180	19.7	0.3	19.7	0.3
2.4725	180	18.8	0.4	19.3	0.2

Из-за плохой погоды в Тунке оптические поляризационные наблюдения были проведены системой МАСТЕР только в 2 поляроидах. Для интервала времени 0.1–1 час после  $T_0$  был получен следующий усреднённый по времени безразмерный параметр Стокса:  $\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = (1 \pm 2)\%$ . К сожалению, невозможно сделать вывод об отсутствии поляризации, если наблюдения проводились только с двумя поляроидами, так как существует возможность, что плоскость поляризации была наклонена на 45 градусов к поляроидам. Для полученной 2% ошибки 1- $\sigma$  верхний предел для степени линейной поляризации составляет около  $P < 15\%$ . В работе [208] (см. рис. 14) значение  $P = 15\%$  соответствует 1- $\sigma$  вероятности  $\mathcal{L} = 100\% - 68\% = 32\%$  для кривой, соответствующей относительной точности в 2%.

Другое характерное значение — стандартная дисперсия параметров Стокса для звёзд поля. Она описывает максимальную точность опреде-

ления параметров Стокса для конкретного направления и времени. Для наблюдений гамма-всплеска GRB 121011A дисперсия составила 6% .

## 2.6 Обсуждение

В этой главе были описаны цели и методы поляриметрических наблюдений, проводимых роботизированной сетью МАСТЕР. Существует большое количество различных классов астрофизических объектов с высокой степенью поляризации излучения. Примечательно, что большинство из них является высокоэнергитичными событиями. В главе также представлены наблюдения сверхновой, гамма-всплеска и нескольких блазаров.

Поляризационные наблюдения блазаров показывают, что поляроиды системы МАСТЕР могут быть успешно применены для измерения степени линейной поляризации выше 5–10% с точностью измерения позиционного угла 3–10 градусов, в зависимости от яркости объекта. Наблюдение блазаров системой МАСТЕР также позволяет производить калибровку степени поляризации и позиционного угла.

Поляризационные измерения необходимы для понимания физики джетов гамма-всплесков: их геометрии, магнитных полей, микрофизики и механизмов излучения. Однако, поляризация собственного оптического излучения гамма-всплесков ещё не была зарегистрирована; существует лишь несколько измерений поляризации послесвечения.

Для GRB 121011A были представлены поляризационные измерения раннего оптического излучения. К сожалению, только два взаимно перпендикулярных поляроида принимали участие в наблюдениях, поэтому было возможным получение только нижней границы поляризации, а позиционный угол остался неопределённым. Безразмерный параметр Стокса оказался меньше 2% ошибки наблюдений. Телескопы сети МАСТЕР могут надёжно регистрировать линейную поляризацию выше 10% и на пределе обнаруживать поляризацию больше 5%. Уровень в 10% для степени линейной поляризации гамма-всплесков предсказывается в некоторых теоретических моделях.

Вспышка сверхновой звезды может наблюдаться в течение нескольких месяцев. Это позволяет получать длинные серии данных, включая

поляриметрию. Открытие значительной поляризации в излучении СН Ia будет независимым аргументом в пользу модели слияния белых карликов как одного из эволюционных сценариев СН Ia. Кроме того, если взрыв некоторых СН Ia окажется асимметричным, встанет вопрос об их пригодности для задач наблюдательной космологии. Последние данные показывают умеренную поляризацию в континууме (меньше 1%) для СН Ia, но более сильную поляризацию в линиях ( $\sim 2\%$ ). Низкая поляризация в континууме излучения СН Ia может говорить о том, что взрыв практически сферический. Однако, теоретические предсказания степени поляризации от асимметричных взрывов модельно зависимы. Кроме того, наблюдаемая поляризация может оказаться неучтённой межзвёздной поляризацией в Галактике и в родительских галактиках. Важно помнить, что к настоящему моменту количество сверхновых с качественно измеренной поляризацией до максимума блеска всё ещё недостаточно для того, чтобы делать выводы о геометрии взрыва.

Была представлена фотометрия в поляроидах для СН Ia 2012bh на основе наблюдений сети МАСТЕР с 27 марта по 15 апреля. Кривая блеска этой сверхновой похожа на кривую блеска «нормальной» СН Ia 1994D. Анализ кривой блеска показал, что максимум блеска был достигнут 31 марта.  $1-\sigma$  верхний предел на степень линейной поляризации СН 2012bh за всё время наблюдений составил 3%. Дальнейшие спектрополяриметрические и поляриметрические наблюдения СН Ia необходимы для исследования геометрии взрыва и распределения вещества вокруг сверхновой и вдоль луча зрения.

### 3 Короткие гамма-всплески и связанные с ними явления

Открытие четырёх миллисекундных радиовспышек [210] вместе с ранее обсуждаемым всплеском Лоримера [211] пробудило интерес к механизмам генерации нейтронными звёздами резко нестационарного радиоизлучения большой мощности. Существует несколько сценариев возникновения быстрых радиовспышек (см. обзор [212]). В данной работе рассматривается сценарий сливающихся нейтронных звёзд как наиболее вероятный.

Возможность генерации миллисекундных радиовспышек сливающимися нейтронными звёздами была предсказана в 1996 году [213]. Достаточно тесная двойная НЗ+НЗ система, излучая гравитационные волны, превращается в сверхкомпактную систему с характерным временем жизни в миллисекунды (несколько орбитальных оборотов). При этом возникают сильные электрические поля, и появляется возможность ускорения релятивистских частиц, которые порождают нетепловое радиоизлучение (см. также [214, 215]). Кроме того, ранее отмечалось [216], что в результате слияния нейтронных звёзд образуется сильно замагниченный быстровращающийся объект (спинар), который способен терять в процессе коллапса до 10% полной энергии в виде электромагнитного излучения (ср. с [217, 218, 219]). Однако излучение спинара (быстровращающегося, возможно, дифференциально) должно быть сильно направленным вдоль оси объекта и, скорее всего, идентифицировано с самим гамма-всплеском [220].

Заманчиво было бы связать быстрые радиовспышки со сливающимися замагниченными нейтронными звёздами, которые рассматриваются как наиболее вероятный источник коротких гамма-всплесков [14, 15] и к тому же являются лучшим источником событий для гравитационно-волновых экспериментов типа LIGO, Virgo и др. [16]. Однако на этом пути необходимо решить главный вопрос — вопрос о частоте таких вспышек во Вселенной. Анализ статистики быстрых радиовспышек показывает, что такие явления должны происходить в типичной галактике типа нашей один раз в 1000 лет [210]. В то же время расчёты частоты слияний

двойных нейтронных звёзд, проведённые методом популяционного синтеза, обычно дают значительно более низкие результаты: одно слияние в  $10^4$ – $10^6$  лет на галактику [221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230]. Ещё более низкую частоту даёт статистика наблюдений гамма-всплесков. Правда, последняя завязана на плохо определённую величину — направленность коротких гамма-всплесков [231, 232]. Однако, как отмечает Тотани [212], теоретические частоты слияний нейтронных звёзд, приводимые в частности в статье [210], относятся к средним или современным значениям, в то время как на самом деле частота слияний нейтронных звёзд существенно менялась с возрастом Вселенной.

### 3.1 Машина Сценариев и частота слияний нейтронных звёзд

Идея популяционного синтеза состоит в том, чтобы, используя наши (не всегда полные) представления об эволюции двойных звёзд, включая релятивистские стадии, с помощью многих миллионов искусственных двойных систем, сгенерированных в компьютере, построить искусственную Вселенную и выяснить частоты встречаемости тех или иных типов двойных звёзд и связанных с ними катаклизмических событий (сверхновых, слияний, распадов и т.д.) [233].

Уже первые расчёты, проведённые методом популяционного синтеза с помощью Машины Сценариев, показали, что частота НЗ+НЗ слияний в настоящую эпоху в галактике типа нашей составляет несколько событий в 4000 лет (см. рис. 1 для случая  $e = 1 \text{ год}^{-1}$ ,  $\leq 20 \text{ Мпк}$  в работе [234]). Последующие расчёты показали сильную эволюцию частоты слияний с возрастом Вселенной [235] и скоростью отдачи<sup>1</sup> [236].

К настоящему времени имеется около десяти групп, которые реализуют идею популяционного синтеза методом Монте-Карло [26]. В данной работе используются результаты Машины Сценариев [24], поскольку это первая и наиболее развитая программа популяционного синтеза. Машина Сценариев, во-первых, включает не только эволюцию двойных звёзд, но и вращательную эволюцию компактных звёзд: нейтронных звёзд и

---

<sup>1</sup>В англоязычной литературе — kick velocity.

белых карликов. Во-вторых, поскольку наше понимание эволюции двойных звёзд содержит определённое количество тёмных мест — плохое понимание стадий с общей оболочкой, возможная анизотропия коллапса, плохое знание начального распределения по отношению масс компонент в двойных системах — в Машине Сценариев применяется идея оптимизации скрытых параметров эволюции. Например, прежде чем проводить расчёты скорости слияния нейтронных звёзд, параметры эволюции оптимизируются путём сравнения искусственной Галактики с наблюдениями [237]. Обязательно достигается примерное совпадение (1) числа смоделированных систем с числом наблюдаемых на небе: двойных радиопульсаров, рентгеновских пульсаров, чёрных дыр с массивными и маломассивными компаньонами; (2) полученной и наблюдаемой функций распределения радиопульсаров по пространственным скоростям; (3) числа и параметров радиопульсаров с оптическими компонентами и т.д.

Если количество опорных наблюдаемых величин (число генетически связанных со слиянием нейтронных звёзд объектов) достаточно велико, то уже не важно, насколько ошибочны скрытые параметры — такие как параметр общей оболочки или начальное распределение двойных звёзд по отношению масс. Другими словами, если статистика наблюдаемых типов двойных систем удовлетворительно объяснена, то можно быть достаточно уверенным в предсказываемой статистике для ненаблюдаемых событий — например таких, как слияние нейтронных звёзд.

Наиболее яркие подтверждённые предсказания Машины Сценариев: открытие радиопульсаров в паре с массивными звёздами (предсказание — [238, 239]; открытие — [240]), открытие сильной эволюции рентгеновского излучения галактик [241, 242, 243] и её связи со скоростью звездообразования [244], предсказание величины и характера эволюции слияния белых карликов с суммарной массой выше Чандрасекаровского предела [32, 27] (см. Рис. 1.4), обнаружение тёмной энергии по статистике гамма-всплесков [235]. Машина Сценариев продолжает развиваться, одна из последних версий описана в работе [25].

Краткая история оценок скорости слияния нейтронных звёзд, нормированная на галактику типа нашей и привязанная к современной эпохе, представлена на Рис. 3.1. На рисунке не показаны работы, в которых

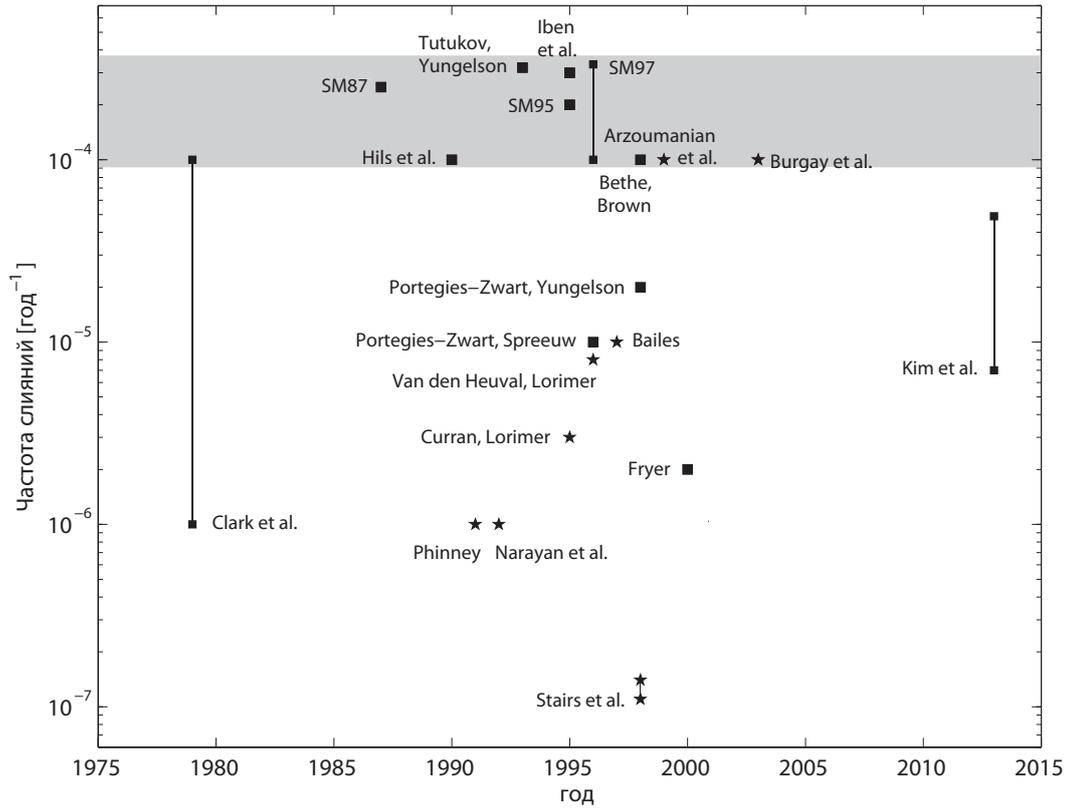


Рис. 3.1: Ожидаемая частота слияний НЗ+НЗ в год в настоящее время, нормированная на галактику с постоянной скоростью звездообразования  $1 M_{\odot}$  в год (типа Млечного Пути). Квадраты — оценки частоты слияний, полученные методом популяционного синтеза (их иногда называют теоретическими). Звёздочки — оценки, полученные из наблюдений (основаны на статистике двойных радиопульсаров). Закрашенная серым область — предсказания Машины Сценариев. Clark et al. — [221]; SM87 — [234]; Hils et al. — [222]; Phinney — [245]; Narayan et al. — [246]; Tutukov, Yungelson — [247]; Iben et al. — [248]; SM95 — [235]; Curran, Lorimer — [249]; SM97 — [236]; Portegies-Zwart, Spreeuw — [223]; Van den Heuvel, Lorimer — [250]; Portegies-Zwart, Yungelson — [226]; Bethe, Brown — [225]; Stairs et al. — [251]; Arzoumanian et al. — [252]; Fryer — [253]; Burgay et al. — [254]; Kim et al. — [230].

разброс в частоте слияний составляет 2–3 порядка [229, 255, 228], кроме самой первой теоретической оценки, выполненной Кларком [221]. Как видно, расчёты Машины Сценариев (SM) — одно слияние в 3000–10000 лет на галактику — не меняются с 1987 года, а наблюдательные данные, наоборот, постепенно приближаются к «теории». В работе Бэте и Брауна [225] частота НЗ+НЗ слияний и НЗ+ЧД слияний составляет  $10^{-5}$

и  $10^{-4}$  событий в год на галактику соответственно. Однако нужно подчеркнуть, что в этой работе Бэте и Браун рассматривали чёрные дыры с массой, близкой к пределу Оппенгеймера-Волкова ( $\sim 2\text{--}2.5 M_{\odot}$ ). Такие маломассивные чёрные дыры формируются из-за гипераккреции во время стадии с общей оболочкой [256]. Следовательно, на Рис. 3.1 маломассивные НЗ+ЧД эквивалентны НЗ+НЗ, поскольку горизонт детектирования для этих двух типов слияний примерно одинаков. То есть частота  $10^{-4}$  событий в год на галактику — это реальная оценка частоты НЗ+НЗ слияний в работе [225].

Поскольку в эксперименте LIGO мы будем фиксировать близкие слияния ( $< 100$  Мпк), то важна именно теоретическая оценка темпа слияний в настоящую эпоху. Для оценки полного количества событий в LIGO и других наземных экспериментах нужно собрать весь темп звездообразования в объёме гравитационно-волнового горизонта и сложить с небольшим вкладом эллиптических галактик.

Следует подчеркнуть, что существенным скрытым параметром популяционного синтеза является так называемая скорость отдачи. Имеется в виду та скорость, которую нейтронная звезда получает в результате анизотропии взрыва сверхновой. Однако этот параметр существенно ограничивается сравнением результатов популяционного синтеза со статистикой двойных нейтронных звёзд и нейтронных звёзд с белыми карликами. Если анизотропия коллапса сверхновой велика, то вероятность сохранить двойную систему после взрыва мала. Особенно анизотропия коллапса сказывается на числе двойных нейтронных звёзд (имеются в виду радиопульсары типа Тейлоровского), поскольку такие системы являются результатом двух взрывов сверхновых в двойной системе. Специальный анализ, проведённый в 1997 году, показал, что анизотропия коллапса не может превышать 100–150 км/с [237] (Рис. 3.2, см. также рис. 1 в работе [236]). А для этого значения скорости отдачи современная скорость слияний на  $10^{11} M_{\odot}$  в спиральной галактике типа нашей должна быть равна одному событию раз в 3000–5000 лет. Но это современная скорость слияния. В прошлом скорость слияний могла быть значительно выше, а в случае космологической природы быстрых радиовспышек мы должны говорить о красных смещениях порядка 0.5–1.

Как впервые было показано расчётами Машины Сценариев, имеется существенная эволюция скорости слияний даже после перенормировки в лабораторную систему отсчёта [235].

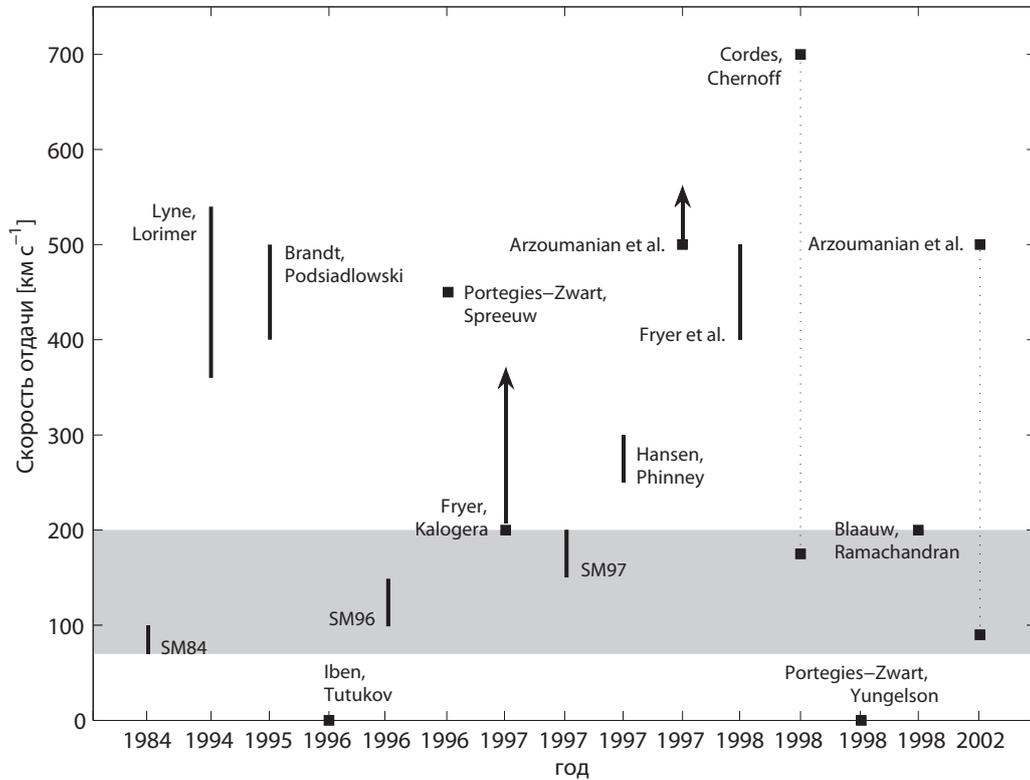


Рис. 3.2: Оценка скорости отдачи разными авторами. Закрашенная серым область — предсказание Машины Сценариев. SM84 ( $\delta$ -образная функция распределения по скоростям) — [238]; Lyne, Lorimer — [257]; Brandt, Podsiadlowski — [258]; Iben, Tutukov — [259]; SM96 — [237]; Portegies-Zwart, Spreeuw — [223]; SM97 — [236]; Fryer, Kalogera — [253]; Hansen, Phinney — [260]; Arzoumanian et al. — [261]; Fryer et al. — [262]; Cordes, Chernoff (функция распределения по скоростям с 2 максимумами) — [263]; Portegies-Zwart, Yungelson — [226]; Blaauw, Ramachandran — [264]; Arzoumanian et al. (функция распределения по скоростям с 2 максимумами) — [265].

С помощью этих расчётов и современных данных о скорости звёздообразования во Вселенной была построена зависимость частоты слияний НЗ+НЗ от красного смещения. Использовалась функция скорости звёздообразования, полученная в работе [266] путём компиляции данных в  $UV$ ,  $FIR$ , радио и  $H_\alpha$  диапазонах и аппроксимированная следующим выражением:  $\dot{\rho}_* = (a + bz)h/[1 + (z/d)^c]$ , где  $h = 0.7$  — безраз-

мерная постоянная Хаббла [267]. Рассматривались два набора значений параметров  $a, b, c, d$ , соответствующие двум разным начальным функциям масс (НФМ): модифицированной НФМ Солпитера с наклоном для больших масс -1.35 [268] и НФМ Болдри и Глазбрука [269] с наклоном для больших масс -1.15. Были выбраны именно такие параметры, поскольку все остальные НФМ лежат между этими двумя крайними случаями. Функция скорости звездообразования во Вселенной в работе [266] определена до  $z \sim 6$ . Однако она была продлена до  $z = 10$ , поскольку измерения функции звездообразования на красных смещениях  $6 < z < 10$  [270, 271, 272] показали, что на больших красных смещениях она продолжается с тем же наклоном, что и около  $z = 6$  [266]. Затем были посчитаны частота слияний нейтронных звёзд,  $n$ , на единицу сопутствующего объёма и интегральная частота слияний,  $N$ , в зависимости от красного смещения  $z$  (см. Рис. 3.3 и Рис. 3.4):

$$n(t) = \int_0^t SFR(\tau)G(t - \tau)d\tau; t \rightarrow z, \quad (3.1)$$

где  $G(t)$  — это частота НЗ+НЗ слияний в галактике после мгновенного звездообразования в момент времени  $t = 0$ .

Интегральная частота НЗ+НЗ слияний внутри сферы с радиусом  $z$ :

$$N(z) = 4\pi \int_0^z \frac{n[t(z)]D(z)^2 dD}{1+z}, \quad (3.2)$$

где  $D(z)$  — метрическое расстояние.

## 3.2 Слияния нейтронных звёзд и быстрые радиовспышки

Важнейшим вопросом остаётся объяснение наблюдаемой частоты событий быстрых радиовспышек. Как отмечает Тортон [210], частоты радиовспышек существенно выше, чем предсказываемая частота слияния нейтронных звёзд. Однако в работе Тотани [212] говорится, что различие практически исчезает, если учесть увеличение скорости слияния ней-

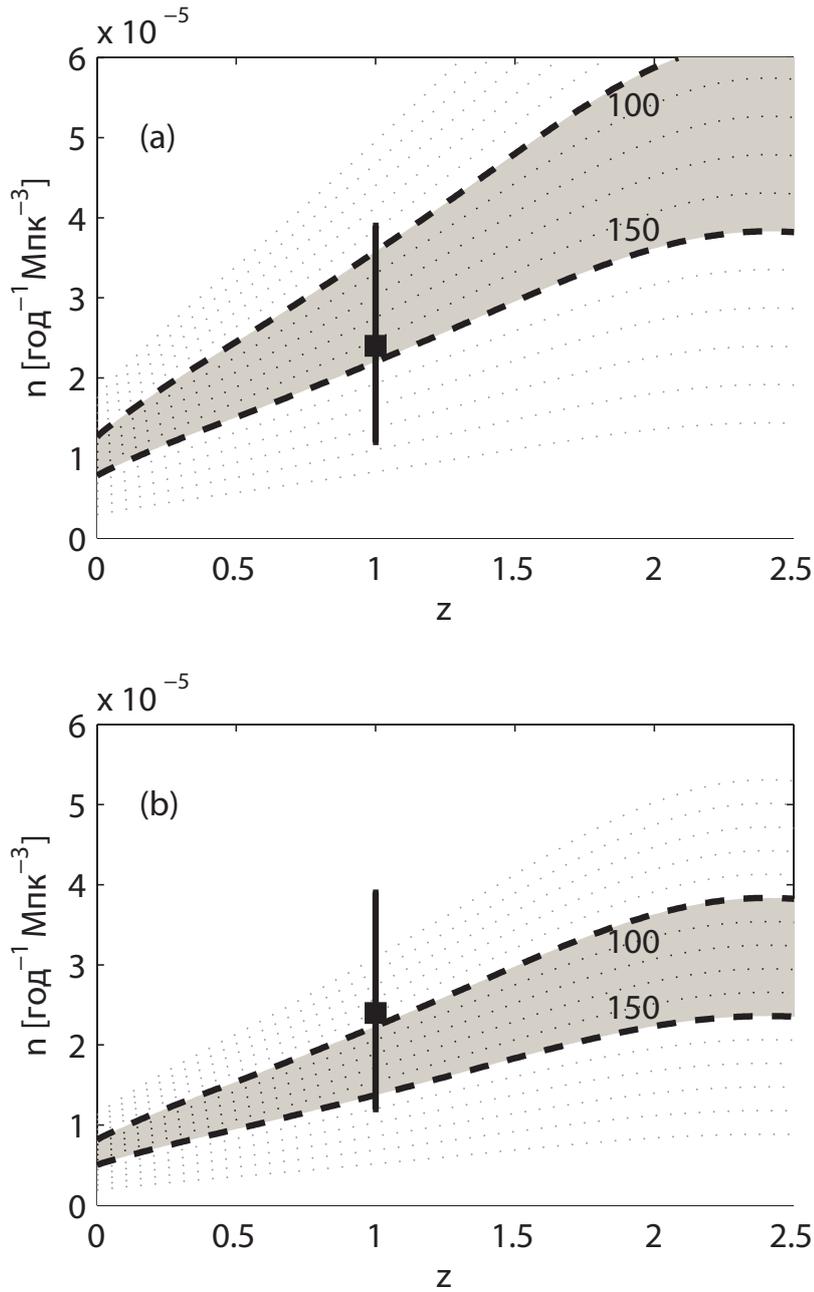


Рис. 3.3: Число НЗ+НЗ слияний в год на Мпк<sup>3</sup> для функции звёздообразования, основанной на модифицированной НФМ Солпитера [268] (а) и НФМ Болдри и Глазбрука [269] (б) для скоростей отдачи в интервале 100–150 км/с. Чёрные квадраты показывают наблюдаемую частоту быстрых радиовспышек, пересчитанную на единицу сопутствующего объёма на  $z = 1$ .

тронных звёзд в прошлом за счёт более высокого темпа звёздообразования во Вселенной. На самом деле для механизма орбитального поджога [213] нейтронные звёзды должны обладать достаточно сильными

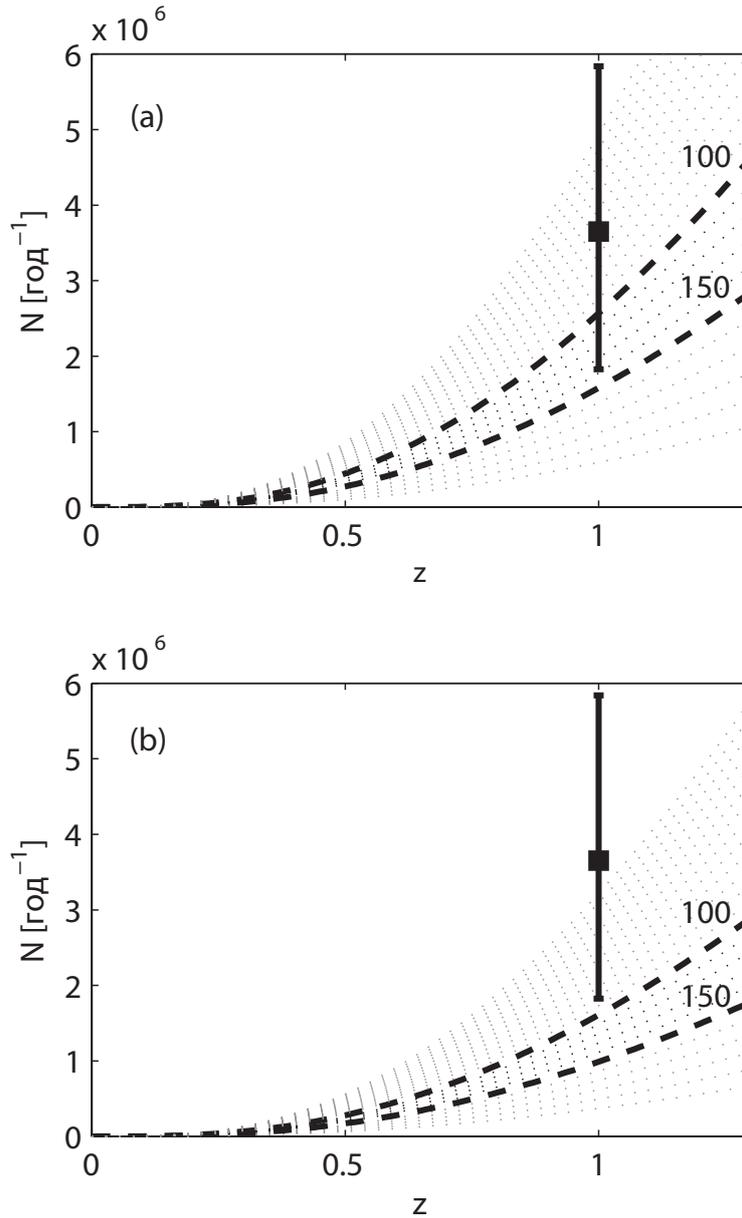


Рис. 3.4: Интегральное число НЗ+НЗ слияний в год внутри сферы с красным смещением  $z$  для функции звёздообразования, основанной на модифицированной НФМ Солпитера [268] (а) и НФМ Болдри и Глазбрука [269] (б) для скоростей отдачи в интервале 100–150 км/с. Чёрные квадраты показывают наблюдаемую частоту быстрых радиовспышек [210].

магнитными полями. Время диссипации магнитного поля нейтронной звезды, к сожалению, известно плохо. Опыт изучения радиопульсаров говорит о том, что магнитное поле диссипирует в первые 10 миллионов лет после рождения нейтронной звезды. Однако, возможно, угасание радиопульсаров связано не с диссипацией магнитного поля, а с измене-

нием угла наклона магнитной оси к оси вращения. С другой стороны, аккрецирующие нейтронные звёзды в двойных системах — рентгеновские пульсары — показывают, что магнитное поле, судя по компаньону, имеет возраст  $10^8$  лет и величину  $10^{12}$  Гс [273]. Расчёты эволюции темпа слияний от возраста галактики после мгновенного звёздообразования показывают, что 70% сливающихся нейтронных звёзд имеют возраст менее 100 миллионов лет [235].

Пересчитаем полученную частоту слияний нейтронных звёзд с помощью Машины Сценариев и сравним с частотой быстрых радиовспышек. Наблюдаемая частота быстрых радиовспышек:  $1.0_{-0.5}^{+0.6} \times 10^4$  в день на небо [210]. Если пересчитать эту величину на единицу сопутствующего объёма на  $z = 1$ , то получится следующая величина:  $2.4_{-1.2}^{+1.5} \times 10^{-5}$  в год на Мпк<sup>3</sup>. Этот результат согласуется с частотой слияния НЗ+НЗ, предсказываемой Машиной Сценариев (Рис. 3.3). Интегральное число слияний в год внутри сферы с радиусом  $z$  и наблюдаемая частота быстрых радиовспышек показаны на Рис. 3.4. Наилучшее совпадение получается для функции звёздообразования, полученной в предположении Солпитерской НФМ [268].

Конкретным механизмом вспышки могло бы быть повторное зажигание пульсарного механизма на последних оборотах перед слиянием, когда орбитальная частота достигает нескольких кГц [213]. Длительность вспышек вполне согласуется с наблюдаемыми значениями. Что касается наблюдаемых потоков, то здесь можно было бы написать много формул. Однако опыт развития теории радиопульсаров показывает, что нет смысла использовать какие-либо формулы для оценки радиоизлучения, а гораздо надёжнее использовать эмпирические данные и простую модель магнитодипольных потерь. Хотя в случае слияния нейтронных звёзд правильнее пользоваться квадрупольной формулой [213], которая в максимуме даёт потери, совпадающие с дипольными. Поэтому можно воспользоваться дипольной формулой, то есть предположить, что мощность излучения пропорциональна четвёртой степени частоты. Поскольку пульсар в Крабе, частота вращения которого составляет 30 Гц, на радио-частотах даёт поток 1000 Янских, то пульсар с частотой 1 кГц — в  $10^6$  раз больше. То есть поток в 1 Янский он бы имел с расстояния 70

Мпк. Для объяснения наблюдаемой интенсивности быстрых радиовспышек необходимо получить 1 Янский с 2 Гпк, то есть в 30 раз дальше. Для этого нужно предположить, что напряжённость магнитного поля быстрых радиовспышек в те же 30 раз больше. Анализ функции распределения радиопульсаров и рентгеновских пульсаров показывает, что такими полями может обладать до половины всех нейтронных звёзд [273]. Фактор двойка — это примерная точность оценки частоты быстрых радиовспышек.

### 3.3 Слияния нейтронных звёзд и короткие гамма-всплески

Недавно Абади и др. [26] опубликовали статью о предсказании наблюдаемой скорости слияния двойных релятивистских звёзд с помощью гравитационно-волновых детекторов. Большая часть статьи посвящена в основном предсказаниям скорости детектирования на будущих, продвинутых моделях LIGO, исходя из наблюдательных данных и данных теоретических предсказаний. Большие неопределённости в предсказываемых частотах слияний связаны с тем, что в теоретических работах [255, 274], на которые опираются Абади и др. [26], значения скорости отдачи берутся в широких диапазонах, хотя в работе [236] было показано, что большие скорости отдачи противоречат наблюдаемому количеству двойных НЗ+НЗ на небе. В работе Абади и др. [26] полностью отсутствуют первые и наиболее полные (с учётом всех наблюдаемых стадий двойных звёзд с релятивистскими компонентами, да и просто обычных звёзд) расчёты скорости слияний нейтронных звёзд, проведённые задолго до публикаций, используемых в данной работе (см. монографию [24]).

Слияния нейтронных звёзд — это результат длительной эволюции двойной системы, которая начинается с двух звёзд главной последовательности, включает в себя две вспышки сверхновых, стадии эжектора, пропеллера и аккректора для нейтронных звёзд и заканчивается стадией эволюции двух нейтронных звёзд, теряющих угловой момент за счёт излучения гравитационных волн. Прежде чем предсказывать частоту слияний нейтронных звёзд и чёрных дыр, необходимо объяснить: (1) суще-

ствование и статистические свойства (количество, характерную светимость) рентгеновских пульсаров с массивными ОВ звёздами; (2) статистику пропеллеров и эжекторов в массивных двойных системах; (3) статистику чёрных дыр в массивных двойных системах; (4) существование двойных радиопулсаров с нейтронными звёздами, белыми карликами и (5) отсутствие таких систем с чёрными дырами. На самом деле ответ на вопрос, как часто сливаются нейтронные звёзды, зависит от того, что происходит с маломассивными звёздами. Это связано с тем, что одно из тёмных мест эволюции двойных звёзд — стадия с общей оболочкой — наиболее сильно проявляется при образовании маломассивных катаклизмических звёзд, управляемых часто гравитационными волнами.

Первые расчёты частоты слияния нейтронных звёзд с помощью Машины Сценариев были сделаны в 1987 году [234] и практически не изменились к настоящему времени. Например, после определения оптимальных параметров эволюции [237] Липуновым, Постновым и Прохоровым было проведено детальное исследование влияния анизотропии коллапса и подтверждены более ранние выводы о том, что скорость отдачи не может быть больше 100–150 км/с для Максвелловского распределения ([237], см. также рис. 1 в статье [236]). В противном случае невозможно объяснить наблюдаемую долю двойных НЗ+НЗ систем среди общего количества пульсаров (Рис. 3.5). Следует подчеркнуть, что характерные скорости зависят от формы начального распределения по скорости отдачи. Так, раньше несколько авторов [257, 265] предлагали не Максвелловские распределения с большей долей нейтронных звёзд с высокой скоростью отдачи (Рис. 3.5). Это особенно важно для объяснения наблюдаемого распределения скоростей радиопулсаров. Однако, частности формирования этого распределения не так важны для данной работы, поскольку во всех распределениях считается, что количество нейтронных звёзд с маленькой начальной скоростью отдачи приблизительно одинаковое с фактором 2.

### 3.4 Молчание LIGO

Если связывать быстрые радиовспышки со слиянием нейтронных звёзд, то следует принять полученную в данных расчётах среднюю оценку ча-

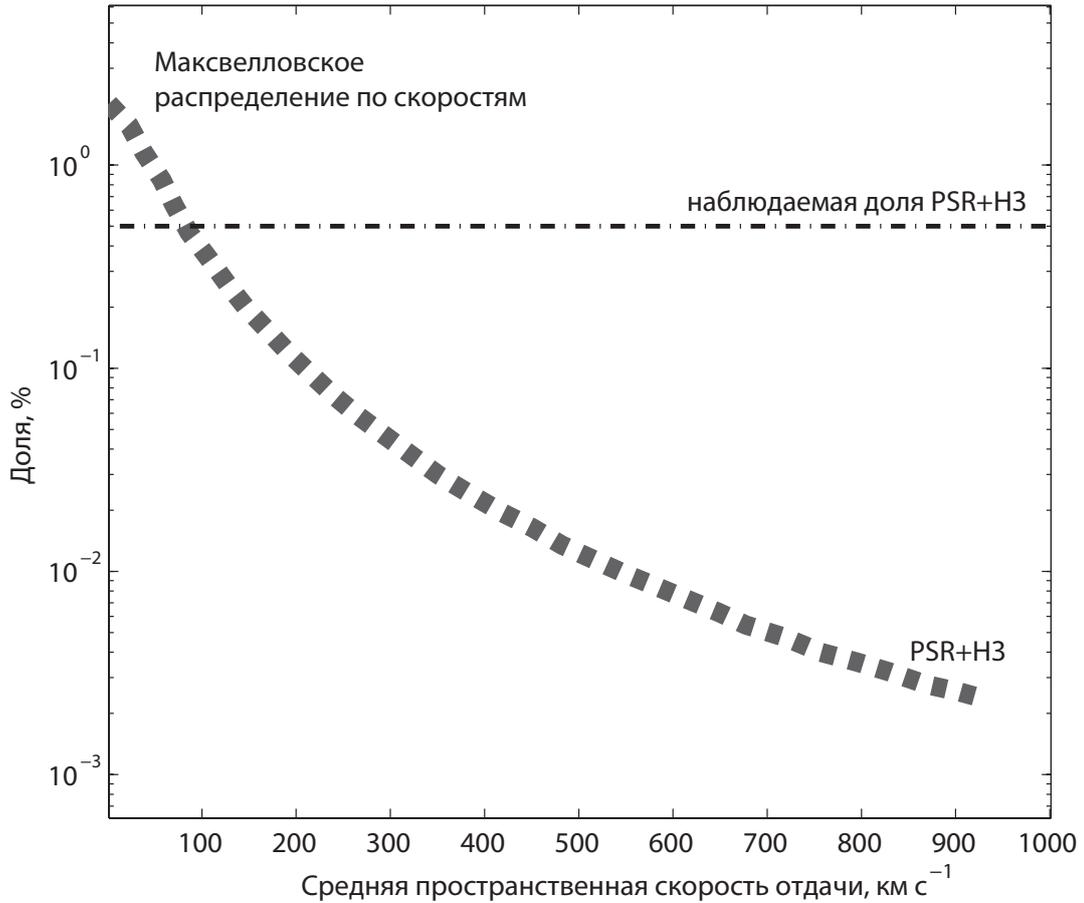


Рис. 3.5: Доля двойных НЗ+НЗ систем среди общего количества пульсаров (PSR) как функция средней скорости отдачи для распределения Максвелла. Горизонтальная штрих-пунктирная линия показывает наблюдаемую долю НЗ+НЗ двойных систем среди общего количества пульсаров [275, 276, 277]. Если начальная скорость отдачи значительно больше 150 км/с, объяснить наблюдаемую долю НЗ+НЗ систем невозможно.

стоты слияний нейтронных звёзд на расстояниях до 40 Мпк (размер горизонта для LIGO S6; [278]), то есть  $10^{-5}$  в год на Мпк<sup>3</sup>. Учитывая малый объём этой области, получаем частоту — 2 события в год, что не противоречит отсутствию событий в эксперименте LIGO (см. Рис. 3.6). Заявленный LIGO предел на частоту слияний нейтронных звёзд из-за отсутствия гравитационно-волновых событий составляет  $1.3 \times 10^{-4}$  в год на Мпк<sup>3</sup> (35 событий в год) [278].

Таким образом, молчание LIGO находится в соответствии с астрономическими наблюдательными данными (Рис. 3.6). Однако, так как типичная чёрная дыра формируется с массой, превышающей массу ней-

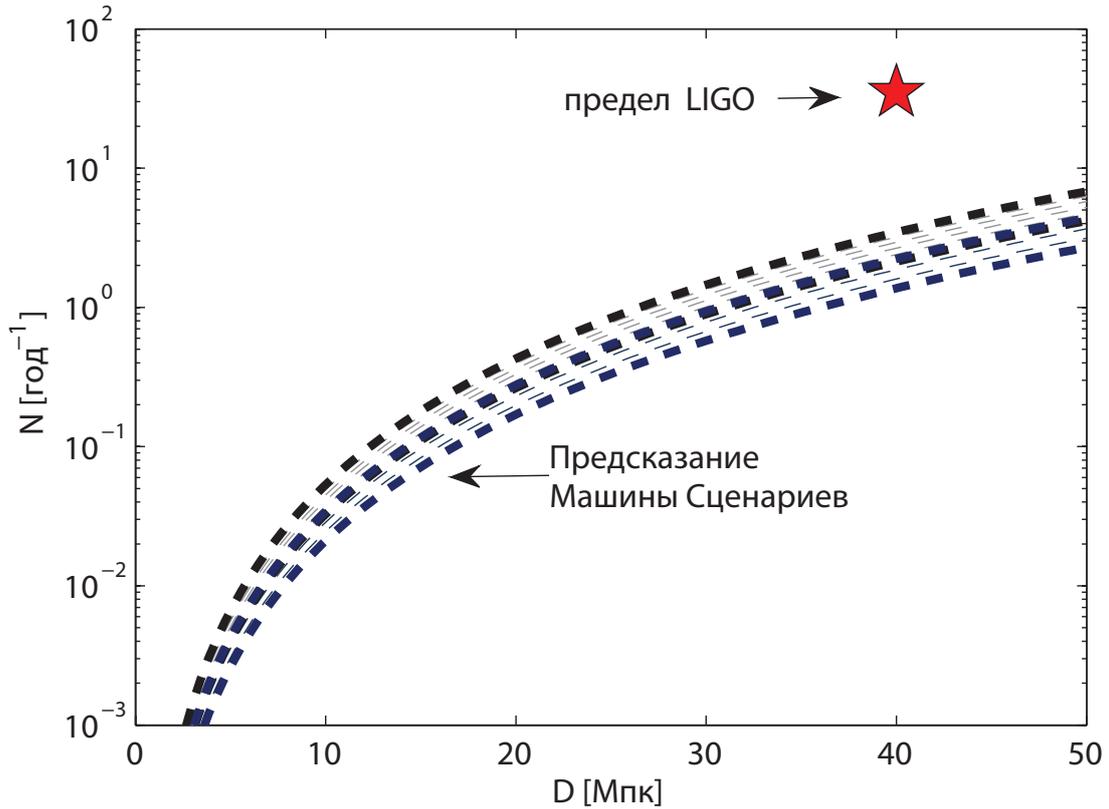


Рис. 3.6: Интегральное число НЗ+НЗ слияний в год внутри сферы радиусом  $D$ , предсказываемое Машиной Сценариев для скоростей отдачи в интервале 100–150 км/с. Чёрная и синяя кривые соответствуют модифицированной НФМ Солпитера [268] и НФМ Болдри и Глазевука [269] соответственно. Звёздочка показывает предел LIGO S6 [278].

тронной звезды, а объём обнаружения пропорционален  $M^{5/2}$ , где  $M$  — «chirp» масса двойной системы, ожидаемая частота обнаружения двойных чёрных дыр в проекте LIGO в 10–100 раз выше ожидаемой частоты для двойных нейтронных звёзд [279]. В соответствии с этим для сливающихся двойных чёрных дыр мы получаем больше 20 событий в год, что слегка противоречит пределу LIGO для событий такого типа (20 событий в год) [278].

Горизонт обнаружения НЗ+НЗ слияний в будущих моделях LIGO будет равен примерно 445 Мпк [26]. Если LIGO достигнет заданной чувствительности, то гравитационные волны от сливающихся нейтронных звёзд будут зарегистрированы. Для таких значений горизонта Машина Сценариев предсказывает несколько тысяч событий в год. Интегральное число слияний в год в объёме до 500 Мпк может быть посчитано с помо-

щью формулы:  $(4 \pm 2) \times 10^{-5} (R/\text{Мпк})^3 \text{ год}^{-1}$ , где  $R$  — размер горизонта в Мпк.

### 3.5 Обсуждение

Таким образом, впервые представлена эволюция частоты слияний нейтронных звёзд как функция красного смещения в рамках разумной функции звёздообразования во Вселенной. Для значения скорости отдачи 100–150 км/с эта функция даёт среднюю скорость слияний: одно событие раз в 500–2000 лет на галактику в сопутствующем объёме, соответствующему красным смещениям  $z = 0.5\text{--}1$ , что не противоречит наблюдаемым оценкам [210]. Анализ основывается на результатах работы популяционного синтеза с помощью Машины Сценариев 1995–1997 годов. Для того, чтобы делать подобные оценки, расчёты должны учитывать следующие 5 эффектов: (1) обмен массами в двойных системах; (2) стадии с общими оболочками; (3) унос углового момента веществом, магнитным звёздным ветром и гравитационными волнами; (4) анизотропию взрыва сверхновых (эффект скорости отдачи); (5) вращательную эволюцию замагниченных нейтронных звёзд и белых карликов. Кроме того, одновременно эти расчёты должны правильно описывать статистику 10 типов двойных звёзд или их наблюдаемые свойства: (1) двойные радиопульсары (с нейтронными звёздами, белыми карликами и оптическими компаньонами); (2) рентгеновские двойные с массивными ОВ звёздами; (3) эволюцию частоты сверхновых звёзд типа Ia с возрастом Вселенной; (4) распределение промежуточных поляров; (5) скорости одиночных радиопульсаров; (6) общую рентгеновскую светимость галактик; (7) чёрные дыры в паре с массивными компаньонами (Cyg X-1); (8) статистические свойства миллисекундных пульсаров, раскрученных в результате аккреции.

Тот факт, что гравитационные волны от слияния нейтронных звёзд не были обнаружены с помощью LIGO, согласуется с нашими астрономическими предсказаниями, но слияния чёрных дыр уже могли бы быть зарегистрированы.

В рамках Машины Сценариев нет никаких противоречий между частотой слияния нейтронных звёзд и количеством быстрых радиовспы-

шек. Более того, ожидается анизотропия излучения быстрых радиовспышек порядка 20%.

## Заключение

Объектом диссертационного исследования являлись сверхновые звёзды и гамма-всплески. Был изучен и решён ряд вопросов, связанных с этими объектами. Первым был исследован вопрос о пригодности сверхновых звёзд типа Ia в качестве космологических индикаторов расстояний. Для решения проблемы серого поглощения, возможных различий в механизмах взрыва и химическом составе сверхновых звёзд типа Ia был предложен подкласс «чистых» сверхновых. Было показано, что основным механизмом взрыва СН Ia в эллиптических галактиках является слияние двух белых карликов.

Обнаружение поляризации на ранних стадиях расширения оболочки СН Ia явилось бы дополнительным аргументом в пользу модели сливающихся белых карликов. С помощью роботизированной сети МАСТЕР были проведены поляризационные измерения СН Ia 2012bh. Кроме того, сетью МАСТЕР ведутся наблюдения поляризации собственного и раннего оптического излучения гамма-всплесков. Результаты измерений поляризации GRB 121011A показали, что безразмерный параметр Стокса для GRB 121011A меньше 2% ошибки наблюдений.

В работе были также рассмотрены короткие гамма-всплески и связанные с ними явления: быстрые радиовспышки и гравитационные волны. Было показано, что в рамках популяционного синтеза — Машина Сценариев — частота слияния нейтронных звёзд согласуется с наблюдаемой частотой быстрых радиовспышек, а отсутствие гравитационно-волновых событий в эксперименте LIGO не противоречит нашим астрономическим предсказаниям.

Основной перспективой будущих исследований является изучение сверхновых звёзд типа Ia как с точки зрения физики процесса, так и с точки зрения наблюдательной космологии. Поскольку объём наблюдательного материала всё время растёт, планируется дополнить выборку «чистых» сверхновых для повышения точности в определении космологических параметров и более тщательного исследования однородности предложенного подкласса сверхновых. Поиск «чистых» сверхновых и дальнейшие фотометрические и поляризационные наблюдения СН Ia будут продол-

жены также с помощью роботизированной сети МАСТЕР. На данный момент сетью МАСТЕР открыто уже 6 «чистых» сверхновых.

Надёжного подтверждения поляризации собственного оптического излучения гамма-всплесков на данный момент не существует. Одна из причин в том, что гамма-всплески — короткоживущие события. Регистрация собственного оптического излучения возможна только с помощью телескопов-роботов, которые способны практически сразу наводиться на объект. Роботизированной сетью МАСТЕР неоднократно было зарегистрировано собственное оптическое излучение гамма-всплесков, однако поляризацию собственного оптического излучения пока зарегистрировать не удалось. Поляризационные исследования гамма-всплесков телескопами сети МАСТЕР продолжаются.

Также планируется постановка и решение новых задач, связанных со сверхновыми звёздами и гамма-всплесками с помощью популяционного синтеза; исследование  $\log N - \log S$  диаграмм, построенных по длинным гамма-всплескам, для изучения ускоренного расширения Вселенной.

## Благодарности

Я глубоко признательна своему научному руководителю профессору Владимиру Михайловичу Липунову, который на протяжении пяти лет вкладывал в моё образование свой труд. Я благодарна своей маме Нине Михайловне Шехониной за любовь и поддержку. Также я благодарна всему коллективу группы МАСТЕР и сотрудникам лаборатории Космического мониторинга за хорошую рабочую обстановку и дружеское отношение. Отдельная благодарность моим соавторам: Е.С. Горбовскому, Н.В. Тюриной, А.С. Кузнецову, Г.В. Липуновой и В.В. Крушинскому, совместная работа с которыми принесла мне неоценимую пользу. Я признательна С.И. Блинникову и Д.Ю. Цветкову за постоянную готовность отвечать на мои вопросы. Я благодарю своих друзей и родных, особенно О.В. Лычковского, С.М. Лисакова и Э.З. Суюнову, неоднократно помогавших в разрешении научных и организационных вопросов на протяжении учёбы в Университете.

Наконец, я выражаю признательность А.В. Тутукову и Ю.Н. Гнедину, взявшим на себя труд быть официальными оппонентами настоящей работы.

Работа была выполнена при поддержке некоммерческого фонда Дмитрия Зимина «Династия».

Мария Пружинская

# А МАСТЕР: наблюдение сверхновых звёзд

Таблица А.1: Сверхновые звёзды, открытые или снятые впервые системой МАСТЕР (2008 г. — июнь 2011 г.).

№	Дата <sup>1</sup>	Близлежащая галактика	$m^2$	Первооткр.	Имя СН	Тип СН	Комментарии
1	30.10.08	PGC 1584648	17.7	П.В. Балануца	2008gy	Ia	[280], [281]
2	13.04.09	Анон.	17.7	CRTS	2009eb	—	[282], [283]
3	13.04.09	Анон.	18.3	CRTS	2009ec	—	[282], [283]
4	17.09.09	UGC 2175	18.2	LOSS	2009iz	Ib/c	[284]
5	08.10.09	IC 1320	16	Р. Арбур	2009jr	Ia	[285]
6	14.10.09	Анон.	15.5	CRTS	2009kk	Ia	[286]
7	08.11.09	IC 1549	18	LOSS	2009li	Ia	[287]
8	17.11.09	Анон.	17.4	CRTS	2009lv	Ia	[288]
9	25.11.09	Анон.	19.3	CRTS	2009nh	Ic	[289]
10	27.11.09	J022619-1857	14.8	SWIFT BAT	2009nz	Ic	Алертное наблюдение GRB 091127, [290]
11	02.12.09	NGC 3839	16.6	К. Итагаки	2009mh	Ia	[291]
12	15.12.09	Анон.	17.4	CRTS	2009mv	Ia	[292]
13	22.12.09	UGC 8255	13.6	П.В. Балануца	2009nr	Ia	Открыта независимо, [293], [294]
14	23.12.09	NGC 2839	18.3	LOSS	2009mx	Ia-p	[295]
15	27.01.10	PGC 51710	15.3 R	П.В. Балануца	2010V	Ia	[296]
16	28.02.10	UGC 10679	16.5	Л. Кокс, Т. Пакетт	2010ag	Ia	[297]
17	06.03.10	Анон.	16.9	ROTSE	2010ai	Ia	[298]
18	28.02.10	MCG 0341142	18.2	LOSS	2010ak	Ic	[299]
19	08.03.10	MCG 130910	17.2	Дж. Ньютон, Т. Пакетт	2010at	Ia-p	[300]
20	09.03.10	Анон.	17.5	CRTS	2010ay	Ic	[301]
21	12.03.10	Анон.	15.2	CRTS	2010ba	Ia	[302]
22	02.05.10	NGC 5177	17	К. Итагаки; PTF	2010cr	—	[303]
23	15.05.10	PGC 1895764	15.2	П.В. Балануца	2010db	—	Звезда с большим собственным движением, [304]
24	29.05.10	PGC 43005	17.6	В.П. Шумков	2010ea	—	[305]
25	01.06.10	NGC 3184	17.2	К. Итагаки	2010dn	—	[306], [307], [308], [309], яркая голубая переменная звезда
26	31.08.10	Анон.	16.6	С. Леонини, Г. Гуеррини	2010ho	Ia	[310]
27	29.08.10	Анон.	18.7	CRTS	2010hu	Ia	[311]
28	20.09.10	NGC 2333	17.6	LOSS	2010ie	Iip	[312]

<sup>1</sup>Дата открытия или первого снимка МАСТЕР для сверхновых, открытых другими обсерваториями.

<sup>2</sup>Звёздная величина на момент открытия — в белом свете, если не отмечено другое.

29	19.10.10	UGC 03552	16.7	П.В. Балануца	2010iz	II P	Открыта независимо, [313]
30	26.10.10	PGC 066672	17.2	П.В. Балануца	—	Ia	[314]
31	27.10.10	UGC 04543	16.3	П.В. Балануца	2010io	Ic	Открыта независимо, [315], [316]
32	04.11.10	UGC 0595	19	П.В. Балануца	2010jo	Ia	Открыта независимо, [317], [316]
33	08.11.10	Анон.	18.1	ROTSE	2010ke	Ia	[318]
34	31.10.10	Анон.	18.5	Т.А. Фатхуллин и др.	2010kj	Ia	[319]
35	03.11.10	Анон.	18.2	CRTS	2010le	Ia	[320]
36	29.11.10	SDSS J120939	15.5	П.В. Балануца	—	—	Не подтверждена, сверхъяркая СН II <sup>n</sup> ?, [321]
37	19.12.10	SDSS J124138	17.9	П.В. Балануца	—	—	Не подтверждена [322]
38	01.01.11	Анон.	18.6	CRTS	2011P	II <sup>n</sup>	[323]
39	29.01.11	Анон.	19	ROTSE	2011ad	Ia	[324]
40	13.02.11	PGC 021381	13.9 V	И.В. Куделина	2011aa	Ia	Открыта независимо, [325]
41	27.02.11	PGC 2440228	19.0	В.П. Шумков	—	—	Не подтверждена, [326]
42	14.03.11	IC 3862	16.2	М. Гавин	2011az	II P	[327]
43	01.03.11	Анон.	15.8	La Sagra Survey	2011bk	Ia	[328]
44	09.03.11	PGC 2128586	19.7	В.П. Шумков	—	—	Не подтверждена, [329]
45	23.03.11	Анон.	19.2	CRTS	2011bt	Ia	[330]
46	26.03.11	082752.77 +704606.0	19.1	В.М. Липунов	—	II <sup>n</sup> ?	Спектр на БТА, [331]
47	26.04.11	PGC 045903	16.2	В.П. Шумков	—	Ia	[332]
48	05.05.11	NGC 5425	15.9	Дж. Ньютон, Т. Пакетт	2011ck	II P	[333]

## В Абсолютные калибровки МАСТЕР в поляроидах и *BVRI* фильтрах

В этом приложении получены значения нуль-пунктов, средних эффективных длин волн и ширин полос для наблюдений в поляроидах и *BVRI* фильтрах, которые требуются для перевода наблюдаемых звёздных величин в спектральную плотность потока излучения. Оценки были выполнены для спектра  $\alpha$  Лиры, а также степенных спектров с показателями  $\alpha = 0, 0.5, 1, 1.5$ . Также были учтены кривые пропускания фильтров, атмосферы и кривая реакции камеры.

Если исследуемый спектр подчиняется строго степенному закону, то спектральная плотность потока может быть вычислена точно с помощью выражений (В.2) и (В.4), в которые нужно подставить  $F_o$ ,  $f_o$ ,  $\lambda_2^{\text{eff}}$  и  $\Delta\nu_{\text{pl}}$  из таблиц В.5 и В.6, для наблюдений, выполненных в поляроидах и *BVRI* фильтрах соответственно.

Для спектров, отличающихся от степенных, но близких к ним, выражения (В.2) и (В.4) приближительны. В то время как величина  $f_{\text{obs}}$  (см. описание параграфа *d* ниже) должна в точности соответствовать потоку в фотонах от источника с произвольным спектром, рассчитанная  $F_{\text{obs}}$  и приведённая в таблице  $\lambda_2^{\text{eff}}$  приближительны.

В тех случаях, когда спектр объекта неизвестен, значения  $F_o$ ,  $f_o$ ,  $\lambda_2^{\text{eff}}$  и  $\Delta\nu_{\text{pl}}$  могут быть взяты из таблиц В.1 и В.2, где они усреднены по кривым пропускания атмосферы для Мауна Кеа и Паломара и показателям спектра при степенном спектре источника. В этих таблицах также дана оценка неопределённости параметров, возникающей вследствие этого усреднения.

Детали расчётов приведены ниже в параграфах.

**а** Нормированные кривые пропускания фильтров и ПЗС представлены на Рис. В.1.

1 ПЗС

2 ПЗС  $\times$  P<sup>1</sup> — до января 2011 года

---

<sup>1</sup>высококонтрастная поляризационная плёнка, <http://www.edmundoptics.com/optics/polarizers/linear-polarizers/high-contrast-linear-polarizing-film/3435>

3 ПЗС  $\times$  R-фильтр  $\times$  P' — январь–июль года

4 ПЗС  $\times$  P<sup>1</sup> — с июля 2011 года (новые поляроиды)

*BVRI* фильтры МАСТЕР представляют собой систему Джонсона-Коузина, их кривые пропускания даны на Рис. В.2.

**б** Использовались три различных кривых пропускания атмосферы: 1) без атмосферы (или «серая» атмосфера); 2) Кривая пропускания атмосферы, построенная для Мауна Кеа [335] для единичной воздушной массы; 3) Кривая пропускания атмосферы для Паломара [336] для единичной воздушной массы. Атмосферное поглощение описывается законом  $10^{-k(\lambda) \sec z}$ , где  $k(\lambda)$  — коэффициент поглощения [mag/air mass],  $\sec z$  — воздушная масса,  $z$  — зенитное расстояние.

**с** Для пересчёта звёздных величин в абсолютные единицы необходим нуль-пункт  $F_o$ :

$$F_{\text{obs}} = F_o 10^{-0.4m} \text{ [эрг/см}^2\text{с]}, \quad (\text{В.1})$$

где  $m$  — звёздная величина, а  $F_o$  вычисляется следующим образом:

$$F_o = \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} S_{\lambda} R(\lambda) d\lambda,$$

где  $S_{\lambda}$  — спектр источника с нулевой звёздной величиной до входа в земную атмосферу [эрг/см<sup>2</sup>сÅ]. В качестве  $S_{\lambda}$  использовался спектр Веги из работы [337]. Нормированная кривая пропускания  $R(\lambda)$  включает в себя кривые пропускания фильтра, ПЗС, атмосферы.

Тогда спектральная плотность потока для некоторой эффективной длины волны  $\lambda_{\text{eff}}$  равна:

$$F_{\nu} \approx F_{\text{obs}} / \Delta\nu \text{ [эрг/см}^2\text{с Гц]}, \quad (\text{В.2})$$

где  $\Delta\nu$  — эффективная ширина полосы, дана в пункте **к**.

---

<sup>1</sup>Широкополосные поляризационные фильтры, изготовленные по технологии линейных проводящих наноструктур, <http://www.edmundoptics.com/optics/polarizers/wire-grid-polarizers/ultra-broadband-wire-grid-polarizers/3330> [22, 334]

**d** Для расчёта интегрального потока в полосе правильнее использовать единицы фотоны/см<sup>2</sup>с, поскольку ПЗС — детектор, измеряющий число фотонов. Вычисления аналогичны параграфу *c*:

$$f_{\text{obs}} = f_o 10^{-0.4m} [\text{фотонов/см}^2\text{с}], \quad (\text{B.3})$$

$$f_o = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} N_{\lambda} R(\lambda) d\lambda ,$$

где  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  — граничные значения для  $R(\lambda)$ ,  $N_{\lambda}$  спектральная плотность потока в фотонах источника с нулевой звёздной величиной до входа в земную атмосферу.  $N_{\lambda}$  может быть получена из  $S_{\lambda}$  следующим образом:

$$N_{\lambda} = S_{\lambda} \frac{\lambda}{hc} .$$

Чтобы найти спектральную плотность потока необходимо знать  $\lambda_{\text{eff}}$  и  $\Delta\nu$ :

$$F_{\nu} \approx h \frac{c}{\lambda_{\text{eff}}} f_{\text{obs}} / \Delta\nu [\text{эрг/см}^2\text{с Гц}]. \quad (\text{B.4})$$

Заметим, что  $f_{\nu} \approx f_{\text{obs}} / \Delta\nu$  [фотонов/см<sup>2</sup>с Гц].

**e–j** Эффективную длину волны можно определить несколькими способами. Некоторые из них зависят от спектра источника.

$$\lambda_1^{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda) d\lambda} ; \quad \lambda_2^{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda} R(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda} R(\lambda) d\lambda} ; \quad \lambda_3^{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} N_{\lambda} R(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} N_{\lambda} R(\lambda) d\lambda} ;$$

$$\frac{c}{\lambda_4^{\text{eff}}} = \frac{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} R(c/\nu) \nu d\nu}{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} R(c/\nu) d\nu} ; \quad \frac{c}{\lambda_5^{\text{eff}}} = \frac{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} S_{\nu} R(c/\nu) \nu d\nu}{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} S_{\nu} R(c/\nu) d\nu} .$$

В последнем выражении использовалось  $S_{\nu} = S_{\lambda} \lambda^2 / c$ . Выражения (B.2) и (B.4) дают одинаковый результат, если использовать  $\lambda_2^{\text{eff}}$ , как следует из его определения.

**к** Эффективная полоса пропускания зависит от спектра источника. Определим её как:

$$\Delta\nu = \frac{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} S_\nu R(c/\nu) d\nu}{S_\nu(\nu_{\text{eff}})}.$$

Если  $\nu_{\text{eff}} = c/\lambda_2^{\text{eff}}$ , то выражение выше аналогично:

$$\Delta\nu = \frac{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} N_\nu R(c/\nu) d\nu}{N_\nu(\nu_{\text{eff}})}.$$

Для степенного спектра  $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$  имеем:

$$\Delta\nu_{\text{pl}} = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} (\nu/\nu_{\text{eff}})^{-\alpha} R(c/\nu) d\nu.$$

Для плоского:

$$\Delta\nu_{\text{flat}} = (\nu_{\max} - \nu_{\min}) \frac{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} S_\nu R(c/\nu) d\nu}{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} S_\nu d\nu}.$$

**l** Спектр Веги был взят из работы [337].

**m** Если звёздная величина  $m$  получена в поляроиде с позиционным углом  $0^\circ$ , и состояние линейной поляризации объекта известно нам полностью, то выражение (B.1) должно быть переписано следующим образом:

$$F_{\text{obs}} = \frac{F_o 10^{-0.4m}}{1 - P_L + 2P_L \cos^2 \theta} \text{ [эрг/см}^2\text{с]},$$

где  $F_{\text{obs}}$  — полный поток энергии, величина  $F_o$  не меняется,  $P_L$  — степень линейной поляризации,  $\theta$  — позиционный угол. Выражение (B.3) должно быть изменено подобным образом. Выражение выше — следствие того, что наблюдаемый через поляриод (с углом  $0^\circ$ ) поток равен:

$$F(0^\circ) = \frac{F_{\text{obs}}(1 - P_L)}{2} + P_L F_{\text{obs}} \cos^2 \theta.$$

Результаты расчётов  $F_o$ ,  $f_o$ ,  $\lambda_2^{\text{eff}}$  и  $\Delta\nu_{\text{pl}}$  приведены в таблицах В.1–В.6.

Величины  $\lambda_2^{\text{eff}}$  и  $\Delta\nu_{\text{pl}}$  для поляроидов представлены в таблицах В.3 и В.5. Как видно, эти величины слабо зависят от конкретного вида кривой пропускания атмосферы и показателя спектра объекта. Поэтому они были дополнительно усреднены по этим параметрам, а затем использованы для расчёта  $F_o$  и  $f_o$ , результат представлен в таблице В.1, также в ней приведена возникающая в результате усреднения неопределённость параметров.

Для фильтров *BVRI*, аналогично, данные в таблицах В.4, В.6, усреднение по кривым пропускания атмосферы и спектрам в таблице В.2.

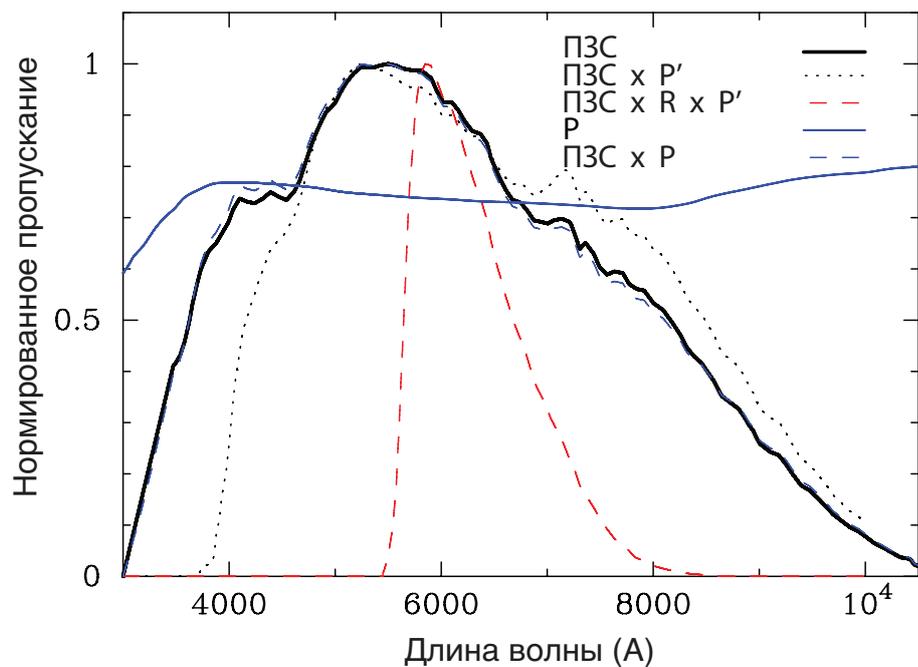


Рис. В.1: Кривые пропускания, нормированные на своё максимальное значение (кроме  $P$ ).

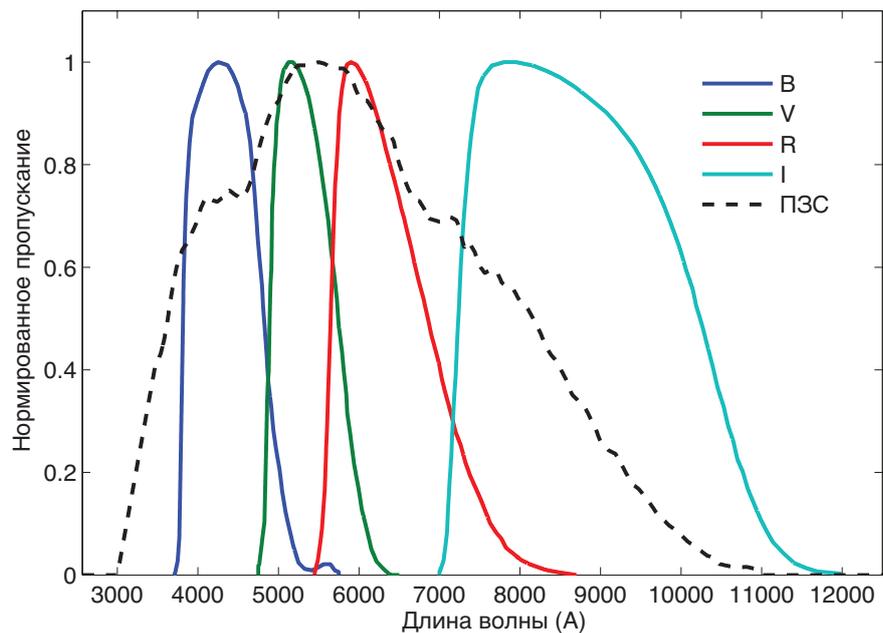


Рис. В.2: Кривые пропускания фильтров и ПЗС, нормированные на своё максимальное значение.

Таблица В.1: Калибровочные параметры для наблюдений в поляроидах. Величины усреднены для двух кривых пропускания атмосферы (МК+Паломар); детали даны в таблицах В.3 и В.5. В случае степенного спектра величины были получены усреднением аналогичных значений для четырёх спектров с показателем степени  $\alpha = 0, 0.5, 1, 1.5$  (см. таблицу В.5). Плюс/минус величины охватывают диапазон усредняемых значений. Верхние индексы соответствуют параграфам в тексте.

Фильтр <sup>a</sup>	$F_o^c$		$f_o^d$		Спектр $\alpha$ Лирь		Степенной спектр	
	$10^{-6}$ эрг/см <sup>2</sup> с	$10^6$ фотонов/см <sup>2</sup> с	$f_o^d$	$10^6$ фотонов/см <sup>2</sup> с	$\lambda_2^{\text{eff}}$ Å	$\Delta\nu_{\text{flat}}^k$ Гц	$\lambda_2^{\text{eff}}$ Å	$\Delta\nu_{\text{pl}}^k$ Гц
1	$12.55 \pm 0.10$	$3.40 \pm 0.02$	$5386 \pm 18$	$4.66 \pm 0.04$	$5746 \pm 317$	$4.1$	$6197 \pm 253$	$3.70 \pm 0.26$
2	$11.04 \pm 0.01$	$3.18 \pm 0.004$	$5714 \pm 12$	$1.03$	$6305 \pm 31$	$4.69 \pm 0.04$	$5736 \pm 316$	$3.14 \pm 0.16$
3	$2.77 \pm 0.004$	$0.87 \pm 0.002$	$6234.5 \pm 0.5$					$0.88 \pm 0.01$
4	$12.63 \pm 0.10$	$3.42 \pm 0.02$	$5372 \pm 18$					$3.70 \pm 0.27$

Таблица В.2: Калибровочные параметры для наблюдений в *BVRl* фильтрах. Величины усреднены для двух кривых пропускания атмосферы (МК+Паломар); детали даны в таблицах В.4 и В.6. В случае степенного спектра величины были получены усреднением аналогичных значений для четырёх спектров с показателем степени  $\alpha = 0, 0.5, 1, 1.5$  (см. таблицу В.6). Плюс/минус величины охватывают диапазон усредняемых значений. Верхние индексы соответствуют параграфам в тексте.

Фильтр	$F_o^c$ $10^{-6}$ эрг/см <sup>2</sup> с	$f_o^d$ 10 <sup>6</sup> фотонов/см <sup>2</sup> с	Спектр $\alpha$ Лирь		Степенной спектр	
			$\lambda_2^{\text{eff}}$ Å	$\Delta\nu_{\text{flat}}^k$ 10 <sup>14</sup> Гц	$\lambda_2^{\text{eff}}$ Å	$\Delta\nu_{\text{pl}}^k$ 10 <sup>14</sup> Гц
B+ПЗС	6.28 ± 0.01	1.38 ± 0.002	4366 ± 2	1.69	4378 ± 23	1.56 ± 0.02
V+ПЗС	3.26 ± 0.002	0.8715 ± 0.0005	5318 ± 1	0.92	5342 ± 13	0.88
R+ПЗС	2.66 ± 0.003	0.83 ± 0.001	6212 ± 1	0.91	6277 ± 29	0.84 ± 0.01
I+ПЗС	1.86 ± 0.001	0.7555 ± 0.0005	8060.5 ± 0.5	0.80	8143 ± 43	0.76 ± 0.01

Таблица В.3: Нуль-пункты, эффективные длины волн, эффективная ширина полосы пропускания для спектра  $\alpha$  Лирь для наблюдений в поляроидах. Верхние индексы соответствуют параграфам в тексте.

Фильтр <sup>a</sup>	Атмосфера <sup>b</sup>	$F_o^c$ $10^{-6}$ эрг/см <sup>2</sup> с	$f_o^d$ 10 <sup>6</sup> фотонов/см <sup>2</sup> с	$\lambda_1^{\text{eff}}$ Å	$\lambda_2^{\text{eff}}$ Å	$\lambda_3^{\text{eff}}$ Å	$\lambda_4^{\text{eff}}$ Å	$\lambda_5^{\text{eff}}$ Å	$\Delta\nu_{\text{flat}}^k$ 10 <sup>14</sup> Гц
Спектр: $\alpha$ Лирь <sup>l</sup>									
1	Нет	13.206	3.501	6095	5267	5574	4918	4998	4.90
2	Нет	11.068	3.142	6527	5639	5916	5597	5399	4.11
3	Нет	2.724	0.853	6345	6224	6261	6228	6190	1.01
4	Нет	13.299	3.517	6088	5253	5559	4919	4989	4.94
1	Паломар	12.446	3.386	6265	5404	5710	5131	5135	4.62
2	Паломар	11.031	3.180	6620	5726	6009	5687	5480	4.10
3	Паломар	2.772	0.870	6358	6235	6272	6239	6200	1.03
4	Паломар	12.529	3.399	6257	5389	5694	5124	5122	4.65
1	МК	12.648	3.418	6224	5369	5675	5080	5100	4.70
2	МК	11.049	3.172	6597	5702	5984	5663	5457	4.10
3	МК	2.763	0.867	6357	6234	6271	6238	6199	1.03
4	МК	12.735	3.432	6216	5354	5659	5074	5087	4.73

Таблица В.4: Нуль-пункты, эффективные длины волн, эффективная ширина полосы пропускания для спектра  $\alpha$  Лирь для наблюдений в  $BVR$ I фильтрах. Верхние индексы соответствуют параграфам в тексте.

Фильтр	Атмосфера <sup>b</sup>	$F_o^c$ $10^{-6}$ эрг/см <sup>2</sup> с	$f_o^d$ 10 <sup>6</sup> фотонов/см <sup>2</sup> с	$\lambda_1^{\text{eff}}$ e Å	$\lambda_2^{\text{eff}}$ f Å	$\lambda_3^{\text{eff}}$ g Å	$\lambda_4^{\text{eff}}$ h Å	$\lambda_5^{\text{eff}}$ j Å	$\Delta\nu^{\text{flat}}$ k 10 <sup>14</sup> Гц
Спектр: $\alpha$ Лирь									
B+ПЗС	Нет	6.384	1.397	4392	4348	4373	4313	4325	1.72
V+ПЗС	Нет	3.255	0.870	5359	5315	5331	5312	5300	0.92
R+ПЗС	Нет	2.616	0.816	6313	6202	6236	6206	6171	0.90
I+ПЗС	Нет	1.857	0.752	8210	8056	8110	8045	8006	0.79
B+ПЗС	МК	6.293	1.382	4408	4364	4388	4330	4340	1.69
V+ПЗС	МК	3.255	0.871	5361	5317	5333	5313	5302	0.92
R+ПЗС	МК	2.657	0.830	6324	6211	6245	6215	6180	0.91
I+ПЗС	МК	1.862	0.755	8214	8060	8114	8048	8009	0.80
B+ПЗС	Паломар	6.272	1.378	4414	4369	4393	4335	4345	1.69
V+ПЗС	Паломар	3.259	0.872	5363	5319	5335	5315	5304	0.92
R+ПЗС	Паломар	2.663	0.832	6325	6213	6247	6216	6181	0.91
I+ПЗС	Паломар	1.864	0.756	8216	8061	8116	8050	8010	0.80

Таблица В.5: Эффективные длины волн, эффективные ширины полос пропускания  $\Delta\nu_{\text{flat}}$  и  $\Delta\nu_{\text{pl}}$  для различных степенных спектров для наблюдений в поляроидах. Верхние индексы соответствуют параграфам в тексте.

Фильтр <sup>a</sup>	Атмосфера <sup>b</sup>	$\lambda_1^{\text{eff } e}$ Å	$\lambda_2^{\text{eff } f}$ Å	$\lambda_3^{\text{eff } g}$ Å	$\lambda_4^{\text{eff } h}$ Å	$\lambda_5^{\text{eff } j}$ Å	$\Delta\nu_{\text{flat } k}$ 10 <sup>14</sup> Гц	$\Delta\nu_{\text{pl } m}$ 10 <sup>14</sup> Гц
Спектр: $S_\nu \propto \nu^0$								
1	Нет	6095	5273	5672	4918	4918	4.19	4.19
2	Нет	6527	5876	6190	5597	5597	3.25	3.25
3	Нет	6345	6265	6304	6228	6228	0.86	0.86
4	Нет	6088	5269	5664	4919	4919	4.19	4.19
1	МК	6224	5431	5818	5080	5080	3.94	3.94
2	МК	6597	5947	6262	5663	5663	3.27	3.27
3	МК	6357	6275	6314	6238	6238	0.88	0.88
4	МК	6216	5421	5807	5074	5074	3.95	3.95
1	Паломар	6265	5481	5864	5131	5131	3.86	3.86
2	Паломар	6620	5972	6286	5687	5687	3.28	3.28
3	Паломар	6358	6276	6316	6239	6239	0.88	0.88
4	Паломар	6257	5471	5853	5124	5124	3.87	3.87
Спектр: $S_\nu \propto \nu^{-1/2}$								
1	Нет	6095	5468	5881	4918	5089	4.19	4.08
2	Нет	6527	6029	6356	5597	5732	3.44	3.19
3	Нет	6345	6284	6324	6228	6246	0.95	0.86
4	Нет	6088	5462	5874	4919	5088	4.19	4.08
1	МК	6224	5621	6020	5080	5250	4.00	3.84
2	МК	6597	6101	6428	5663	5800	3.49	3.21
3	МК	6357	6294	6335	6238	6256	0.97	0.88
4	МК	6216	5610	6010	5074	5242	4.01	3.85
1	Паломар	6265	5669	6064	5131	5301	3.94	3.77
2	Паломар	6620	6126	6452	5687	5825	3.50	3.22
3	Паломар	6358	6296	6337	6239	6257	0.97	0.88
4	Паломар	6257	5658	6054	5124	5292	3.95	3.77
Спектр: $S_\nu \propto \nu^{-1}$								
1	Нет	6095	5672	6095	4918	5273	4.13	3.90
2	Нет	6527	6190	6527	5597	5876	3.57	3.09
3	Нет	6345	6304	6345	6228	6265	1.01	0.86
4	Нет	6088	5664	6088	4919	5269	4.12	3.90
1	МК	6224	5818	6224	5080	5431	3.99	3.68
2	МК	6597	6262	6597	5663	5947	3.63	3.11
3	МК	6357	6314	6357	6238	6275	1.03	0.87
4	МК	6216	5807	6216	5074	5421	4.00	3.69
1	Паломар	6265	5864	6265	5131	5481	3.95	3.61
2	Паломар	6620	6286	6620	5687	5972	3.66	3.12
3	Паломар	6358	6316	6358	6239	6276	1.03	0.87
4	Паломар	6257	5853	6257	5124	5471	3.95	3.62
Спектр: $S_\nu \propto \nu^{-1.5}$								

1	Нет	6095	5881	6309	4918	5468	3.99	3.66
2	Нет	6527	6356	6699	5597	6029	3.61	2.95
3	Нет	6345	6324	6367	6228	6284	1.04	0.85
4	Нет	6088	5874	6304	4919	5462	3.99	3.66
1	МК	6224	6020	6428	5080	5621	3.92	3.47
2	МК	6597	6428	6768	5663	6101	3.71	2.97
3	МК	6357	6335	6379	6238	6294	1.06	0.87
4	МК	6216	6010	6423	5074	5610	3.91	3.47
1	Паломар	6265	6064	6465	5131	5669	3.89	3.41
2	Паломар	6620	6452	6790	5687	6126	3.73	2.98
3	Паломар	6358	6337	6381	6239	6296	1.06	0.87
4	Паломар	6257	6054	6460	5124	5658	3.89	3.41

Таблица В.6: Эффективные длины волн, эффективные ширины полос пропускания  $\Delta\nu_{\text{flat}}$  и  $\Delta\nu_{\text{pl}}$  для различных степенных спектров для наблюдений в *BVRI* фильтрах. Верхние индексы соответствуют параграфам в тексте.

Фильтр	Атмосфера <sup>b</sup>	$\lambda_1^{\text{eff } e}$ Å	$\lambda_2^{\text{eff } f}$ Å	$\lambda_3^{\text{eff } g}$ Å	$\lambda_4^{\text{eff } h}$ Å	$\lambda_5^{\text{eff } j}$ Å	$\Delta\nu_{\text{flat}}^k$ 10 <sup>14</sup> Гц	$\Delta\nu_{\text{pl}}^m$ 10 <sup>14</sup> Гц
Спектр: $S_\nu \propto \nu^0$								
V+ПЗС	Нет	4392	4339	4365	4313	4313	1.60	1.60
V+ПЗС	Нет	5359	5326	5342	5311	5311	0.88	0.88
R+ПЗС	Нет	6313	6240	6275	6206	6206	0.83	0.83
I+ПЗС	Нет	8210	8097	8152	8045	8045	0.76	0.76
V+ПЗС	МК	4408	4355	4381	4330	4330	1.58	1.58
V+ПЗС	МК	5361	5329	5345	5313	5313	0.88	0.88
R+ПЗС	МК	6324	6249	6285	6215	6215	0.84	0.84
I+ПЗС	МК	8214	8100	8156	8048	8048	0.76	0.76
V+ПЗС	Паломар	4414	4361	4387	4335	4335	1.57	1.57
V+ПЗС	Паломар	5363	5331	5347	5315	5315	0.88	0.88
R+ПЗС	Паломар	6325	6250	6287	6216	6216	0.84	0.84
I+ПЗС	Паломар	8216	8102	8157	8050	8050	0.76	0.76
Спектр: $S_\nu \propto \nu^{-1/2}$								
V+ПЗС	Нет	4392	4352	4378	4313	4326	1.56	1.60
V+ПЗС	Нет	5359	5334	5351	5312	5319	0.87	0.88
R+ПЗС	Нет	6313	6257	6294	6206	6223	0.79	0.82
I+ПЗС	Нет	8210	8124	8181	8045	8070	0.74	0.76
V+ПЗС	МК	4408	4368	4394	4330	4342	1.54	1.57
V+ПЗС	МК	5361	5337	5353	5313	5321	0.87	0.88
R+ПЗС	МК	6324	6267	6304	6215	6232	0.80	0.84
I+ПЗС	МК	8214	8128	8185	8048	8074	0.74	0.76
V+ПЗС	Паломар	4414	4374	4401	4335	4348	1.53	1.56
V+ПЗС	Паломар	5363	5339	5355	5315	5323	0.87	0.88
R+ПЗС	Паломар	6325	6268	6306	6216	6233	0.81	0.84
I+ПЗС	Паломар	8216	8129	8186	8050	8075	0.74	0.76

Спектр: $S_\nu \propto \nu^{-1}$								
B+ПЗС	Нет	4392	4365	4392	4313	4339	1.52	1.60
V+ПЗС	Нет	5359	5342	5359	5311	5326	0.85	0.88
R+ПЗС	Нет	6313	6275	6313	6206	6240	0.76	0.82
I+ПЗС	Нет	8210	8152	8210	8045	8097	0.71	0.76
B+ПЗС	МК	4408	4381	4408	4330	4355	1.50	1.57
V+ПЗС	МК	5361	5345	5361	5313	5329	0.85	0.88
R+ПЗС	МК	6324	6285	6324	6215	6249	0.77	0.84
I+ПЗС	МК	8214	8156	8214	8048	8100	0.71	0.76
B+ПЗС	Паломар	4414	4387	4414	4335	4361	1.50	1.56
V+ПЗС	Паломар	5363	5347	5363	5315	5331	0.85	0.88
R+ПЗС	Паломар	6325	6287	6325	6216	6250	0.77	0.84
I+ПЗС	Паломар	8216	8157	8216	8050	8102	0.71	0.76
Спектр: $S_\nu \propto \nu^{-1.5}$								
B+ПЗС	Нет	4392	4378	4405	4313	4352	1.47	1.58
V+ПЗС	Нет	5359	5351	5367	5311	5334	0.83	0.88
R+ПЗС	Нет	6313	6294	6333	6206	6257	0.72	0.82
I+ПЗС	Нет	8210	8181	8240	8045	8124	0.68	0.75
B+ПЗС	МК	4408	4394	4422	4330	4368	1.46	1.56
V+ПЗС	МК	5361	5353	5370	5313	5337	0.83	0.88
R+ПЗС	МК	6324	6304	6344	6215	6267	0.73	0.83
I+ПЗС	МК	8214	8185	8244	8048	8128	0.68	0.75
B+ПЗС	Паломар	4414	4401	4428	4335	4374	1.45	1.55
V+ПЗС	Паломар	5363	5355	5372	5315	5339	0.84	0.88
R+ПЗС	Паломар	6325	6306	6346	6216	6268	0.74	0.83
I+ПЗС	Паломар	8216	8186	8246	8050	8129	0.68	0.76

## Список литературы

- [1] Baade W. and Zwicky F., «On Super-novae», *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 20, pp. 254–259, May 1934. [4](#), [19](#)
- [2] Minkowski R., «Spectra of Supernovae», *Publications of the ASP*, vol. 53, p. 224, Aug. 1941. [4](#), [19](#)
- [3] Pskovskii Y. P., «Identification of the Absorption Spectrum of the Type I Supernova.», *Soviet Astronomy*, vol. 12, p. 750, Apr. 1969. [4](#), [19](#)
- [4] Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P., et al., «Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant», *Astronomical Journal*, vol. 116, pp. 1009–1038, Sept. 1998. [6](#), [21](#), [39](#)
- [5] Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G., et al., «Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 517, pp. 565–586, June 1999. [6](#), [21](#), [39](#), [66](#)
- [6] Klebesadel R. W., Strong I. B., and Olson R. A., «Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 182, p. L85, June 1973. [7](#)
- [7] Andreev O. N., Aptekar R. L., Golentskii S. V., et al., «Observations of cosmic gamma-ray bursts in the Konus experiment on Venera 13 and 14», *Kosmicheskie Issledovaniia*, vol. 21, pp. 480–488, May 1983. [7](#)
- [8] Mazets E. P., Golenetskii S. V., Ilinskii V. N., et al., *Preliminary results on gamma-ray transients in the Konus experiment on Venera 11 and 12*, pp. 124–136. 1983. [7](#)
- [9] Friedlander M., Gehrels N., and Macomb D. J., eds., *Compton Gamma Ray Observatory*, vol. 280 of *American Institute of Physics Conference Series*, 1993. [7](#)

- [10] Paciesas W. S., Meegan C. A., Pendleton G. N., et al., «The Fourth BATSE Burst Revised Catalog (Paciesas+ 1999)», *VizieR Online Data Catalog*, vol. 9020, p. 0, 2000. [7](#)
- [11] Costa E., Feroci M., Frontera F., et al., «GRB 970228», *IAU Circulars*, vol. 6572, p. 1, Mar. 1997. [7](#)
- [12] Sahu K. C., Livio M., Petro L., et al., «The optical counterpart to  $\gamma$ -ray burst GRB970228 observed using the Hubble Space Telescope», *Nature*, vol. 387, pp. 476–478, May 1997. [7](#)
- [13] Cucchiara A., Levan A. J., Fox D. B., et al., «A Photometric Redshift of  $z \sim 9.4$  for GRB 090429B», *Astrophysical Journal*, vol. 736, p. 7, July 2011. [7](#)
- [14] Blinnikov S. I., Novikov I. D., Perevodchikova T. V., et al., «Exploding Neutron Stars in Close Binaries», *Soviet Astronomy Letters*, vol. 10, pp. 177–179, Apr. 1984. [8](#), [80](#)
- [15] Paczynski B., «Gamma-ray bursters at cosmological distances», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 308, pp. L43–L46, Sept. 1986. [8](#), [80](#)
- [16] Grishchuk L. P., Lipunov V. M., Postnov K. A., et al., «REVIEWS OF TOPICAL PROBLEMS: Gravitational wave astronomy: in anticipation of first sources to be detected», *Physics Uspekhi*, vol. 44, p. 1, Jan. 2001. [8](#), [80](#)
- [17] Hjorth J. and Bloom J. S., *The Gamma-Ray Burst - Supernova Connection*, pp. 169–190. Nov. 2012. [8](#)
- [18] Bogomazov A. I. and Tutukov A. V., «Type Ia supernovae: Non-standard candles of the universe», *Astronomy Reports*, vol. 55, pp. 497–504, June 2011. [8](#), [44](#), [45](#)
- [19] Pruzhinskaya M. V., Krushinsky V. V., Lipunova G. V., et al., «Optical polarization observations with the MASTER robotic net», *New Astronomy*, vol. 29, pp. 65–74, May 2014. [9](#), [12](#)

- [20] Lipunov V. M., Krylov A. V., Kornilov V. G., et al., «MASTER: The Mobile Astronomical System of Telescope-Robots», *Astronomische Nachrichten*, vol. 325, pp. 580–582, Oct. 2004. [9](#), [31](#), [57](#)
- [21] Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., et al., «Master Robotic Net», *Advances in Astronomy*, vol. 2010, 2010. [9](#), [31](#), [33](#), [36](#), [57](#)
- [22] Kornilov V. G., Lipunov V. M., Gorbovskoy E. S., et al., «Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms», *Experimental Astronomy*, vol. 33, pp. 173–196, Mar. 2012. [9](#), [31](#), [57](#), [58](#), [59](#), [102](#)
- [23] Gorbovskoy E. S., Lipunov V. M., Kornilov V. G., et al., «The MASTER-II network of robotic optical telescopes. First results», *Astronomy Reports*, vol. 57, pp. 233–286, Apr. 2013. [9](#), [31](#), [57](#), [58](#), [59](#)
- [24] Lipunov V. M., Postnov K. A., and Prokhorov M. E., *The scenario machine: Binary star population synthesis*. 1996. [10](#), [40](#), [81](#), [90](#)
- [25] Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E., et al., «Description of the “Scenario Machine”», *Astronomy Reports*, vol. 53, pp. 915–940, Oct. 2009. [10](#), [40](#), [82](#)
- [26] Abadie J., Abbott B. P., Abbott R., et al., «TOPICAL REVIEW: Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors», *Classical and Quantum Gravity*, vol. 27, p. 173001, Sept. 2010. [11](#), [81](#), [90](#), [93](#)
- [27] Lipunov V. M., Panchenko I. E., and Pruzhinskaya M. V., «The mechanism of supernova Ia explosion in elliptical galaxies», *New Astronomy*, vol. 16, pp. 250–252, July 2011. [11](#), [46](#), [50](#), [66](#), [82](#)
- [28] Pruzhinskaya M. V., Gorbovskoy E. S., and Lipunov V. M., «“Pure” supernovae and accelerated expansion of the Universe», *Astronomy Letters*, vol. 37, pp. 663–669, Oct. 2011. [12](#)
- [29] Lipunov V. M. and Pruzhinskaya M. V., «Scenario Machine: fast radio bursts, short gamma-ray burst, dark energy and Laser Interferometer

- Gravitational-wave Observatory silence», *Monthly Notices of the RAS*, Mar. 2014. [12](#)
- [30] Burns C. R., Stritzinger M., Phillips M. M., et al., «The Carnegie Supernova Project: Light-curve Fitting with SNooPy», *Astronomical Journal*, vol. 141, p. 19, Jan. 2011. [14](#), [29](#), [31](#)
- [31] Jorgensen H. E., Lipunov V. M., Panchenko I. E., et al., «Evolution of Supernova Explosion Rates in the Universe», *Astrophysical Journal*, vol. 486, p. 110, Sept. 1997. [14](#), [39](#), [40](#), [41](#)
- [32] Totani T., Morokuma T., Oda T., et al., «Delay Time Distribution Measurement of Type Ia Supernovae by the Subaru/XMM-Newton Deep Survey and Implications for the Progenitor», *Publications of the ASJ*, vol. 60, pp. 1327–, Dec. 2008. [14](#), [40](#), [41](#), [42](#), [82](#)
- [33] Shapley H. and Curtis H. D., «The Scale of the Universe», *Bulletin of the National Research Council*, Vol. 2, Part 3, No. 11, p. 171-217, vol. 2, pp. 171–217, May 1921. [18](#)
- [34] Baade W., «The Absolute Photographic Magnitude of Supernovae.», *Astrophysical Journal*, vol. 88, p. 285, Oct. 1938. [19](#)
- [35] Perlmutter S., Gabi S., Goldhaber G., et al., «Measurements of the Cosmological Parameters Omega and Lambda from the First Seven Supernovae at  $Z = 0.35$ », *Astrophysical Journal*, vol. 483, p. 565, July 1997. [20](#), [28](#), [47](#)
- [36] Schmidt B. P., Suntzeff N. B., Phillips M. M., et al., «The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 507, pp. 46–63, Nov. 1998. [21](#)
- [37] Garnavich P. M., Kirshner R. P., Challis P., et al., «Constraints on Cosmological Models from Hubble Space Telescope Observations of High-z Supernovae», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 493, p. L53, Feb. 1998. [21](#)

- [38] Hamuy M., Phillips M. M., Suntzeff N. B., et al., «The Absolute Luminosities of the Calan/Tololo Type IA Supernovae», *Astronomical Journal*, vol. 112, p. 2391, Dec. 1996. [21](#), [24](#), [27](#)
- [39] Tammann G. A. and Leibundgut B., «Supernova studies. IV - The global value of  $H_0$  from supernovae IA and the peculiar motion of field galaxies», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 236, pp. 9–14, Sept. 1990. [22](#)
- [40] Branch D. and Miller D. L., «Type IA supernovae as standard candles», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 405, pp. L5–L8, Mar. 1993. [22](#)
- [41] Miller D. L. and Branch D., «Supernova absolute-magnitude distributions», *Astronomical Journal*, vol. 100, pp. 530–539, Aug. 1990. [22](#), [26](#)
- [42] Della Valle M. and Panagia N., «Type IA supernovae in late type galaxies - Reddening correction, scale height, and absolute maximum magnitude», *Astronomical Journal*, vol. 104, pp. 696–703, Aug. 1992. [22](#)
- [43] Rood H. J., «Type IA supernovae in Lyon groups of galaxies», *Publications of the ASP*, vol. 106, pp. 170–172, Feb. 1994. [22](#)
- [44] Sandage A., Saha A., Tammann G. A., et al., «The Cepheid distance to IC 4182 - Calibration of  $M_V(\max)$  for SN IA 1937C and the value of  $H_0$ », *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 401, pp. L7–L10, Dec. 1992. [22](#)
- [45] Sandage A. and Tammann G. A., «The Hubble diagram in V for supernovae of Type IA and the value of  $H(0)$  therefrom», *Astrophysical Journal*, vol. 415, pp. 1–9, Sept. 1993. [22](#)
- [46] Sandage A., Saha A., Tammann G. A., et al., «The Cepheid distance to NGC 5253: Calibration of  $M(\max)$  for the type IA supernovae SN 1972E and SN 1895B», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 423, pp. L13–L17, Mar. 1994. [22](#)

- [47] Filippenko A. V., Richmond M. W., Branch D., et al., «The subluminous, spectroscopically peculiar type IA supernova 1991bg in the elliptical galaxy NGC 4374», *Astronomical Journal*, vol. 104, pp. 1543–1556, Oct. 1992. [22](#)
- [48] Leibundgut B., Kirshner R. P., Phillips M. M., et al., «SN 1991bg - A type IA supernova with a difference», *Astronomical Journal*, vol. 105, pp. 301–313, Jan. 1993. [22](#)
- [49] Foley R. J., Challis P. J., Chornock R., et al., «Type Iax Supernovae: A New Class of Stellar Explosion», *Astrophysical Journal*, vol. 767, p. 57, Apr. 2013. [22](#), [23](#)
- [50] Bartunov O. S., Tsvetkov D. Y., and Pavlyuk N. N., «Sternberg Astronomical Institute Supernova Catalogue, and radial distribution of supernovae in host galaxies», *Highlights of Astronomy*, vol. 14, pp. 316–316, Aug. 2007. [23](#)
- [51] Mclaughlin D. B., «The Relation between Light-Curves and Luminosities of Novae», *Publications of the ASP*, vol. 57, p. 69, Apr. 1945. [24](#)
- [52] Arkhipova V. P. в книге «Эруптивные зёзды»; под редакцией Боярчука А. А. и Гершберга Р. Е.; Москва: Издательство «Наука», 376 стр. с илл., p. 17, 1970. [24](#)
- [53] Корулов I. М., «Сравнение морфологических признаков и пространственного распределения новых и сверхновых звёзд», *Известия Крымской астрофизической обсерватории*, p. 140, 1955. [24](#)
- [54] Корулов I. М. В сб.: *Труды IV совещания по вопросам космогонии*; Москва: Изд-во АН СССР, p. 40, 1955. [24](#)
- [55] Pskovskii Y. P., «The Photometric Properties of Supernovae.», *Soviet Astronomy*, vol. 11, p. 63, Aug. 1967. [24](#)
- [56] Barbon R., Ciatti F., and Rosino L., «On the light curve and properties of type I supernovae.», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 25, pp. 241–248, 1973. [24](#), [25](#)

- [57] Bertola F. and Sussi M. G., «Stellar populations and supernovae», *Contributions dell'Osservatorio Astrofisica dell'Universita di Padova in Asiago*, vol. 176, p. 3, 1965. [25](#)
- [58] Barbon R., Capaccioli M., and Ciatti F., «Studies of supernovae.», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 44, pp. 267–271, Nov. 1975. [25](#)
- [59] Pskovskii I. P., «Light curves, color curves, and expansion velocity of type I supernovae as functions of the rate of brightness decline», *Soviet Astronomy*, vol. 21, pp. 675–682, Dec. 1977. [25](#)
- [60] Rust B. W., *Use of supernovae light curves for testing the expansion hypothesis and other cosmological relations*. PhD thesis, Oak Ridge National Lab., TN., 1974. [25](#)
- [61] de Vaucouleurs G. and Pence W. D., «Type I supernovae as cosmological clocks», *Astrophysical Journal*, vol. 209, pp. 687–692, Nov. 1976. [25](#)
- [62] Rust B. W., «The Use of Supernovae for Determining the Hubble Constant and Estimating Extragalactic Distances.», in *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 7 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, p. 236, Mar. 1975. [25](#)
- [63] Branch D., «Some statistical properties of type I supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 248, pp. 1076–1080, Sept. 1981. [25](#)
- [64] Boisseau J. R. and Wheeler J. C., «The effect of background galaxy contamination on the absolute magnitude and light curve speed class of type IA supernovae», *Astronomical Journal*, vol. 101, pp. 1281–1285, Apr. 1991. [26](#)
- [65] Hamuy M., Phillips M. M., Maza J., et al., «The optical light curves of SN 1980N and SN 1981D in NGC 1316 (Fornax A)», *Astronomical Journal*, vol. 102, pp. 208–217, July 1991. [26](#)
- [66] Phillips M. M., «The absolute magnitudes of Type IA supernovae», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 413, pp. L105–L108, Aug. 1993. [26](#), [27](#)

- [67] Phillips M. M., Lira P., Suntzeff N. B., et al., «The Reddening-Free Decline Rate Versus Luminosity Relationship for Type IA Supernovae», *Astronomical Journal*, vol. 118, pp. 1766–1776, Oct. 1999. [27](#)
- [68] Tripp R., «A two-parameter luminosity correction for Type IA supernovae», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 331, pp. 815–820, Mar. 1998. [27](#)
- [69] Hoefflich P. and Khokhlov A., «Explosion Models for Type IA Supernovae: A Comparison with Observed Light Curves, Distances,  $H_0$ , and  $Q_0$ », *Astrophysical Journal*, vol. 457, p. 500, Feb. 1996. [27](#), [30](#)
- [70] Hamuy M., Phillips M. M., Suntzeff N. B., et al., «The Morphology of Type IA Supernovae Light Curves», *Astronomical Journal*, vol. 112, p. 2438, Dec. 1996. [27](#)
- [71] Germany L. M., Reiss D. J., Schmidt B. P., et al., «Results of the Mount Stromlo Abell cluster supernova search», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 415, pp. 863–878, Mar. 2004. [27](#)
- [72] Riess A. G., Press W. H., and Kirshner R. P., «Using Type IA supernova light curve shapes to measure the Hubble constant», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 438, pp. L17–L20, Jan. 1995. [27](#)
- [73] Leibundgut B., Tammann G. A., Cadonau R., et al., «Supernova studies. VII - an atlas of light curves of supernovae type I», *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, vol. 89, pp. 537–579, Sept. 1991. [28](#)
- [74] Riess A. G., Press W. H., and Kirshner R. P., «A Precise Distance Indicator: Type IA Supernova Multicolor Light-Curve Shapes», *Astrophysical Journal*, vol. 473, p. 88, Dec. 1996. [28](#)
- [75] Jha S., Riess A. G., and Kirshner R. P., «Improved Distances to Type Ia Supernovae with Multicolor Light-Curve Shapes: MLCS2k2», *Astrophysical Journal*, vol. 659, pp. 122–148, Apr. 2007. [28](#)

- [76] Goldhaber G., Groom D. E., Kim A., et al., «Timescale Stretch Parameterization of Type Ia Supernova B-Band Light Curves», *Astrophysical Journal*, vol. 558, pp. 359–368, Sept. 2001. [28](#)
- [77] Krisciunas K., Phillips M. M., Suntzeff N. B., et al., «Optical and Infrared Photometry of the Nearby Type Ia Supernovae 1999ee, 2000bh, 2000ca, and 2001ba», *Astronomical Journal*, vol. 127, pp. 1664–1681, Mar. 2004. [28](#)
- [78] Jha S., Kirshner R. P., Challis P., et al., «UBVRI Light Curves of 44 Type Ia Supernovae», *Astronomical Journal*, vol. 131, pp. 527–554, Jan. 2006. [28](#)
- [79] Prieto J. L., Rest A., and Suntzeff N. B., «A New Method to Calibrate the Magnitudes of Type Ia Supernovae at Maximum Light», in *Observing Dark Energy* (Wolff S. C. and Lauer T. R., eds.), vol. 339 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 69, Aug. 2005. [28](#), [32](#)
- [80] Guy J., Astier P., Nobili S., et al., «SALT: a spectral adaptive light curve template for type Ia supernovae», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 443, pp. 781–791, Dec. 2005. [29](#), [46](#)
- [81] Nugent P., Thomas R., and Aldering G., «Optimizing Type Ia supernova follow-up in future dark energy surveys», *Journal of Physics Conference Series*, vol. 125, p. 012011, July 2008. [29](#)
- [82] Wang L., Goldhaber G., Aldering G., et al., «Multicolor Light Curves of Type Ia Supernovae on the Color-Magnitude Diagram: A Novel Step toward More Precise Distance and Extinction Estimates», *Astrophysical Journal*, vol. 590, pp. 944–970, June 2003. [29](#)
- [83] Hoyle F. and Fowler W. A., «Nucleosynthesis in Supernovae.», *Astrophysical Journal*, vol. 132, p. 565, Nov. 1960. [30](#)
- [84] Arnett W. D., «A Possible Model of Supernovae: Detonation of  $^{12}\text{C}$ », *Astrophysics and Space Science*, vol. 5, pp. 180–212, Oct. 1969. [30](#)

- [85] Colgate S. A. and McKee C., «Early Supernova Luminosity», *Astrophysical Journal*, vol. 157, p. 623, Aug. 1969. [30](#)
- [86] Mazurek T. J. and Wheeler J. C., «Thermonuclear Explosions in Stars», *Fundamental Cosmic Physics*, vol. 5, pp. 193–286, 1980. [30](#)
- [87] Khokhlov A. M., «Delayed detonation model for type IA supernovae», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 245, pp. 114–128, May 1991. [30](#)
- [88] Hoefflich P., Mueller E., and Khokhlov A., «Light curve models for type IA supernovae - Physical assumptions, their influence and validity», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 268, pp. 570–590, Feb. 1993. [30](#)
- [89] Khokhlov A., Mueller E., and Hoefflich P., «Light curves of Type IA supernova models with different explosion mechanisms», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 270, pp. 223–248, Mar. 1993. [30](#)
- [90] Hoefflich P., Khokhlov A. M., and Wheeler J. C., «Delayed detonation models for normal and subluminous type IA supernovae: Absolute brightness, light curves, and molecule formation», *Astrophysical Journal*, vol. 444, pp. 831–847, May 1995. [30](#)
- [91] Hoefflich P., Khokhlov A., Wheeler J. C., et al., «Maximum Brightness and Postmaximum Decline of Light Curves of Type IA Supernovae: A Comparison of Theory and Observations», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 472, p. L81, Dec. 1996. [30](#)
- [92] Nomoto K., «Accreting white dwarf models for type I supernovae. II - Off-center detonation supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 257, pp. 780–792, June 1982. [30](#)
- [93] Livne E., «Successive detonations in accreting white dwarfs as an alternative mechanism for type I supernovae», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 354, pp. L53–L55, May 1990. [30](#)
- [94] Livne E. and Glasner A. S., «Numerical simulations of off-center detonations in helium shells», *Astrophysical Journal*, vol. 370, pp. 272–281, Mar. 1991. [30](#)

- [95] Woosley S. E. and Weaver T. A., «Sub-Chandrasekhar mass models for Type IA supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 423, pp. 371–379, Mar. 1994. [30](#)
- [96] Livne E. and Arnett D., «Explosions of Sub-Chandrasekhar Mass White Dwarfs in Two Dimensions», *Astrophysical Journal*, vol. 452, p. 62, Oct. 1995. [30](#)
- [97] Tsvetkov D. Y., Balanutsa P. V., Lipunov V. M., et al., «Photometric observations of the supernova 2009nr», *Astronomy Letters*, vol. 37, pp. 775–782, 2011. [31](#), [37](#), [47](#)
- [98] Conley A., Sullivan M., Hsiao E. Y., et al., «SiFTO: An Empirical Method for Fitting SN Ia Light Curves», *Astrophysical Journal*, vol. 681, pp. 482–498, July 2008. [31](#)
- [99] Kessler R., Bernstein J. P., Cinabro D., et al., «SNANA: A Public Software Package for Supernova Analysis», *Publications of the ASP*, vol. 121, pp. 1028–1035, Sept. 2009. [31](#)
- [100] Hamuy M., Folatelli G., Morrell N. I., et al., «The Carnegie Supernova Project: The Low-Redshift Survey», *Publications of the ASP*, vol. 118, pp. 2–20, Jan. 2006. [31](#), [33](#)
- [101] Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., and Davis M., «Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds», *Astrophysical Journal*, vol. 500, p. 525, June 1998. [31](#), [61](#), [69](#)
- [102] Cardelli J. A., Clayton G. C., and Mathis J. S., «The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction», *Astrophysical Journal*, vol. 345, pp. 245–256, Oct. 1989. [31](#)
- [103] Nugent P., Kim A., and Perlmutter S., «K-Corrections and Extinction Corrections for Type Ia Supernovae», *Publications of the ASP*, vol. 114, pp. 803–819, Aug. 2002. [33](#)

- [104] Hsiao E. Y., Conley A., Howell D. A., et al., «K-Corrections and Spectral Templates of Type Ia Supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 663, pp. 1187–1200, July 2007. [33](#)
- [105] Kessler R., Becker A. C., Cinabro D., et al., «First-Year Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters», *Astrophysical Journal, Supplement*, vol. 185, pp. 32–84, Nov. 2009. [33](#), [46](#)
- [106] Astier P., Guy J., Regnault N., et al., «The Supernova Legacy Survey: measurement of  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$  and  $w$  from the first year data set», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 447, pp. 31–48, Feb. 2006. [33](#), [46](#)
- [107] Miknaitis G., Pignata G., Rest A., et al., «The ESSENCE Supernova Survey: Survey Optimization, Observations, and Supernova Photometry», *Astrophysical Journal*, vol. 666, pp. 674–693, Sept. 2007. [33](#), [46](#)
- [108] Li W. D., Filippenko A. V., Treffers R. R., et al., «The Lick Observatory Supernova Search», in *American Institute of Physics Conference Series* (Holt S. S. and Zhang W. W., eds.), vol. 522 of *American Institute of Physics Conference Series*, pp. 103–106, June 2000. [33](#)
- [109] Baltay C., Rabinowitz D., Hadjiyska E., et al., «The La Silla-QUEST Low Redshift Supernova Survey», *Publications of the ASP*, vol. 125, pp. 683–694, June 2013. [33](#)
- [110] Djorgovski S. G., Drake A. J., Mahabal A. A., et al., «The Catalina Real-Time Transient Survey (CRTS)», *ArXiv e-prints*, Feb. 2011. [33](#)
- [111] Law N. M., Kulkarni S. R., Dekany R. G., et al., «The Palomar Transient Factory: System Overview, Performance, and First Results», *Publications of the ASP*, vol. 121, pp. 1395–1408, Dec. 2009. [33](#)
- [112] Dickinson M., Giavalisco M., and GOODS Team, «The Great Observatories Origins Deep Survey», in *The Mass of Galaxies at Low and High Redshift* (Bender R. and Renzini A., eds.), p. 324, 2003. [33](#)

- [113] Oke J. B. and Sandage A., «Energy Distributions, K Corrections, and the Stebbins-Whitford Effect for Giant Elliptical Galaxies», *Astrophysical Journal*, vol. 154, p. 21, Oct. 1968. [34](#)
- [114] Kim A., Goobar A., and Perlmutter S., «A Generalized K Correction for Type IA Supernovae: Comparing R-band Photometry beyond  $z=0.2$  with B, V, and R-band Nearby Photometry», *Publications of the ASP*, vol. 108, p. 190, Feb. 1996. [34](#), [35](#)
- [115] Balanutsa P. and Lipunov V., «Supernova 2009nr in UGC 8255.», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2111, p. 1, Jan. 2010. [36](#)
- [116] Foley R. J. and Esquerdo G., «Supernovae 2009nr and 2010A», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2112, p. 1, Jan. 2010. [36](#)
- [117] Khan R., Prieto J. L., Pojmański G., et al., «Pre-discovery and Follow-up Observations of the Nearby SN 2009nr: Implications for Prompt Type Ia Supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 726, p. 106, Jan. 2011. [36](#), [37](#), [47](#), [53](#)
- [118] Livio M., «The Progenitors of Type Ia Supernovae», in *Type Ia Supernovae, Theory and Cosmology* (Niemeyer J. C. and Truran J. W., eds.), p. 33, 2000. [38](#)
- [119] Whelan J. and Iben Jr. I., «Binaries and Supernovae of Type I», *Astrophysical Journal*, vol. 186, pp. 1007–1014, Dec. 1973. [38](#), [40](#), [44](#), [46](#), [66](#)
- [120] Iben Jr. I. and Tutukov A. V., «Supernovae of type I as end products of the evolution of binaries with components of moderate initial mass (M not greater than about 9 solar masses)», *Astrophysical Journal, Supplement*, vol. 54, pp. 335–372, Feb. 1984. [38](#), [40](#), [44](#), [66](#)
- [121] Webbink R. F., «Double white dwarfs as progenitors of R Coronae Borealis stars and Type I supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 277, pp. 355–360, Feb. 1984. [38](#), [40](#), [44](#), [66](#)

- [122] Hachisu I., Kato M., Nomoto K., et al., «A New Evolutionary Path to Type IA Supernovae: A Helium-rich Supersoft X-Ray Source Channel», *Astrophysical Journal*, vol. 519, pp. 314–323, July 1999. [39](#)
- [123] Li W., Bloom J. S., Podsiadlowski P., et al., «Exclusion of a luminous red giant as a companion star to the progenitor of supernova SN 2011fe», *Nature*, vol. 480, pp. 348–350, Dec. 2011. [39](#)
- [124] Mannucci F., Della Valle M., Panagia N., et al., «The supernova rate per unit mass», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 433, pp. 807–814, Apr. 2005. [40](#)
- [125] Fedorova A. V., Tutukov A. V., and Yungelson L. R., «Type-Ia Supernovae in Semidetached Binaries», *Astronomy Letters*, vol. 30, pp. 73–85, Feb. 2004. [41](#)
- [126] Förster F., Wolf C., Podsiadlowski P., et al., «Constraints on Type Ia supernova progenitor time delays from high-z supernovae and the star formation history», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 368, pp. 1893–1904, June 2006. [41](#)
- [127] Wang B., Liu Z., Han Y., et al., «Birthrates and delay times of Type Ia supernovae», *Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy*, vol. 53, pp. 586–590, Mar. 2010. [41](#)
- [128] Yungelson L., Livio M., Truran J. W., et al., «A Model for the Galactic Population of Binary Supersoft X-Ray Sources», *Astrophysical Journal*, vol. 466, p. 890, Aug. 1996. [41](#)
- [129] Yungelson L. R., «Population synthesis for progenitors of type Ia supernovae», in *White dwarfs: cosmological and galactic probes* (Sion E. M., Vennes S., and Shipman H. L., eds.), vol. 332 of *Astrophysics and Space Science Library*, pp. 163–173, 2005. [41](#)
- [130] Popova E. I., Tutukov A. V., and Yungelson L. R., «Study of physical properties of spectroscopic binary stars», *Astrophysics and Space Science*, vol. 88, pp. 55–80, Nov. 1982. [41](#)

- [131] Abt H. A., «Normal and abnormal binary frequencies», *Annual Review of Astron and Astrophys*, vol. 21, pp. 343–372, 1983. [41](#)
- [132] Landau L. D. and Lifshitz E. M., *The classical theory of fields*. 1975. [42](#)
- [133] Gilfanov M. and Bogdán Á., «An upper limit on the contribution of accreting white dwarfs to the type Ia supernova rate», *Nature*, vol. 463, pp. 924–925, Feb. 2010. [43](#)
- [134] Aguirre A. N., «Dust versus Cosmic Acceleration», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 512, pp. L19–L22, Feb. 1999. [44](#), [45](#)
- [135] Aguirre A., «Intergalactic Dust and Observations of Type IA Supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 525, pp. 583–593, Nov. 1999. [45](#)
- [136] Bassett B. A. and Kunz M., «Cosmic distance-duality as a probe of exotic physics and acceleration», *Physical Review D*, vol. 69, p. 101305, May 2004. [45](#)
- [137] Mörtsell E. and Goobar A., «Constraints on intergalactic dust from quasar colours», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 9, p. 9, Sept. 2003. [45](#)
- [138] Holwerda B. W., «Host galaxy extinction of Type Ia supernovae: co-evolution of interstellar medium structure and the extinction law with star formation», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 386, pp. 475–480, May 2008. [45](#)
- [139] Nugent P. E., Howell D. A., Sullivan M., et al., «Palomar Transient Factory Discovers Another Possible super-Chandrasekhar Type Ia Supernova», *The Astronomer’s Telegram*, vol. 2917, p. 1, Oct. 2010. [45](#)
- [140] Kowalski M., Rubin D., Aldering G., et al., «Improved Cosmological Constraints from New, Old, and Combined Supernova Data Sets», *Astrophysical Journal*, vol. 686, pp. 749–778, Oct. 2008. [46](#), [51](#)

- [141] Hicken M., Wood-Vasey W. M., Blondin S., et al., «Improved Dark Energy Constraints from  $\sim 100$  New CfA Supernova Type Ia Light Curves», *Astrophysical Journal*, vol. 700, pp. 1097–1140, Aug. 2009. [46](#), [47](#), [51](#)
- [142] Paturel G., Petit C., Prugniel P., et al., «HYPERLEDA. I. Identification and designation of galaxies», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 412, pp. 45–55, Dec. 2003. [47](#)
- [143] Riess A. G., Strolger L.-G., Tonry J., et al., «Type Ia Supernova Discoveries at  $z > 1$  from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution», *Astrophysical Journal*, vol. 607, pp. 665–687, June 2004. [47](#)
- [144] Riess A. G., Strolger L.-G., Casertano S., et al., «New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at  $z \geq 1$ : Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy», *Astrophysical Journal*, vol. 659, pp. 98–121, Apr. 2007. [47](#)
- [145] Tsvetkov D. Y., Balanutsa P., Gorbovskoy E., et al., «The Light Curves of Type Ia Supernova 2008gy», *Peremennye Zvezdy*, vol. 30, p. 3, May 2010. [47](#)
- [146] Tsvetkov D. Y., Pavlyuk N. N., and Bartunov O. S., «The SAI Catalog of Supernovae and Radial Distributions of Supernovae of Various Types in Galaxies», *Astronomy Letters*, vol. 30, pp. 729–736, Nov. 2004. [47](#)
- [147] Barbon R., Buondí V., Cappellaro E., et al., «The Asiago Supernova Catalogue - 10 years after», *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, vol. 139, pp. 531–536, Nov. 1999. [47](#)
- [148] Lampeitl H., Smith M., Nichol R. C., et al., «The Effect of Host Galaxies on Type Ia Supernovae in the SDSS-II Supernova Survey», *Astrophysical Journal*, vol. 722, pp. 566–576, Oct. 2010. [54](#)
- [149] Sullivan M., Ellis R. S., Aldering G., et al., «The Hubble diagram of type Ia supernovae as a function of host galaxy morphology», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 340, pp. 1057–1075, Apr. 2003. [54](#)

- [150] Sullivan M., Conley A., Howell D. A., et al., «The dependence of Type Ia Supernovae luminosities on their host galaxies», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 406, pp. 782–802, Aug. 2010. [54](#)
- [151] Covino S., Lazzati D., Ghisellini G., et al., «GRB 990510: linearly polarized radiation from a fireball», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 348, pp. L1–L4, Aug. 1999. [56](#), [72](#)
- [152] Rol E., Wijers R. A. M. J., Vreeswijk P. M., et al., «GRB 990712: First Indication of Polarization Variability in a Gamma-Ray Burst Afterglow», *Astrophysical Journal*, vol. 544, pp. 707–711, Dec. 2000. [56](#)
- [153] Covino S., Malesani D., Ghisellini G., et al., «Polarimetry of GRB020813: evidence for variability.», *GRB Coordinates Network*, vol. 1498, p. 1, 2002. [56](#), [72](#)
- [154] Barth A. J., Sari R., Cohen M. H., et al., «Optical Spectropolarimetry of the GRB 020813 Afterglow», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 584, pp. L47–L51, Feb. 2003. [56](#), [72](#)
- [155] Bersier D., McLeod B., Garnavich P. M., et al., «The Strongly Polarized Afterglow of GRB 020405», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 583, pp. L63–L66, Feb. 2003. [56](#), [72](#)
- [156] Mundell C. G., Steele I. A., Smith R. J., et al., «Early Optical Polarization of a Gamma-Ray Burst Afterglow», *Science*, vol. 315, pp. 1822–, Mar. 2007. [56](#), [73](#)
- [157] Steele I. A., Mundell C. G., Smith R. J., et al., «Ten per cent polarized optical emission from GRB090102», *Nature*, vol. 462, pp. 767–769, Dec. 2009. [56](#), [73](#)
- [158] Rol E., Wijers R. A. M. J., Fynbo J. P. U., et al., «Variable polarization in the optical afterglow of GRB 021004», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 405, pp. L23–L27, July 2003. [56](#)

- [159] Greiner J., Klose S., Reinsch K., et al., «Evolution of the polarization of the optical afterglow of the  $\gamma$ -ray burst GRB030329», *Nature*, vol. 426, pp. 157–159, Nov. 2003. [56](#), [72](#)
- [160] Uehara T., Toma K., Kawabata K. S., et al., «GRB 091208B: First Detection of the Optical Polarization in Early Forward Shock Emission of a Gamma-Ray Burst Afterglow», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 752, p. L6, June 2012. [56](#), [73](#), [74](#)
- [161] Shakhovskoi N. M., «Optical linear polarization of the type I supernova in NGC 7723», *Soviet Astronomy Letters*, vol. 2, p. 107, June 1976. [56](#)
- [162] McCall M. L., Reid N., Bessell M. S., et al., «Are supernovae round? II - Spectropolarimetry of SN 1983g in NGC 4753», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 210, pp. 839–843, Oct. 1984. [56](#)
- [163] Wang L., Wheeler J. C., Li Z., et al., «Broadband Polarimetry of Supernovae: SN 1994D, SN 1994Y, SN 1994ae, SN 1995D, and SN 1995H», *Astrophysical Journal*, vol. 467, p. 435, Aug. 1996. [56](#)
- [164] Howell D. A., Höflich P., Wang L., et al., «Evidence for Asphericity in a Subluminous Type Ia Supernova: Spectropolarimetry of SN 1999by», *Astrophysical Journal*, vol. 556, pp. 302–321, July 2001. [56](#), [66](#)
- [165] Wang L., Baade D., and Patat F., «Spectropolarimetric Diagnostics of Thermonuclear Supernova Explosions», *Science*, vol. 315, pp. 212–, Jan. 2007. [56](#)
- [166] Chornock R., Filippenko A. V., Branch D., et al., «Spectropolarimetry of the Peculiar Type Ia Supernova 2005hk», *Publications of the ASP*, vol. 118, pp. 722–732, May 2006. [56](#), [66](#)
- [167] Ahn Y. H., Tsen A. W., Kim B., et al., «Photocurrent Imaging of p-n Junctions in Ambipolar Carbon Nanotube Transistors», *Nano Letters*, vol. 7, pp. 3320–3323, Nov. 2007. [59](#)
- [168] Voshchinnikov N. V., «Interstellar extinction and interstellar polarization: Old and new models», *Journal of Quantitative*

*Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 113, pp. 2334–2350, Dec. 2012. [59](#)

- [169] Serkowski K., Mathewson D. S., and Ford V. L., «Wavelength dependence of interstellar polarization and ratio of total to selective extinction», *Astrophysical Journal*, vol. 196, pp. 261–290, Feb. 1975. [60](#), [61](#), [69](#)
- [170] Gorbovskoy E. S., Lipunova G. V., Lipunov V. M., et al., «Prompt, early and afterglow optical observations of five  $\gamma$ -ray bursts: GRB 100901A, GRB 100902A, GRB 100905A, GRB 100906A and GRB 101020A», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 421, pp. 1874–1890, Apr. 2012. [60](#)
- [171] Serkowski K., «Statistical Analysis of the Polarization and Reddening of the Double Cluster in Perseus», *Acta Astronomica*, vol. 8, p. 135, 1958. [61](#)
- [172] Blinov D., Myserlis I., Angelakis E., et al., «Optical and gamma-ray brightening of blazar OC 457», *The Astronomer's Telegram*, vol. 4779, p. 1, Feb. 2013. [61](#)
- [173] Barkhouse W. A. and Hall P. B., «Quasars in the 2MASS Second Incremental Data Release», *Astronomical Journal*, vol. 121, pp. 2843–2850, May 2001. [61](#)
- [174] Larionov V. M. and Efimova N. V., «Blazars 3C 454.3 and B3 1633+38 bright in near-infrared.», *The Astronomer's Telegram*, vol. 5411, p. 1, Sept. 2013. [62](#)
- [175] Larionov V. M., Morozova D. A., Efimova N. V., et al., «Multi-wavelength activity of blazar 3C 454.3», *The Astronomer's Telegram*, vol. 5423, p. 1, Sept. 2013. [62](#)
- [176] Hoflich P., «Asphericity Effects in Scattering Dominated Photospheres», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 246, p. 481, June 1991. [66](#)

- [177] Wang L. and Wheeler J. C., «Spectropolarimetry of Supernovae», *Annual Review of Astron and Astrophys*, vol. 46, pp. 433–474, Sept. 2008. [66](#)
- [178] Wang L., Wheeler J. C., and Hoefflich P., «Polarimetry of the Type IA Supernova SN 1996X», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 476, p. L27, Feb. 1997. [66](#)
- [179] Leonard D. C., Li W., Filippenko A. V., et al., «Evidence for Spectropolarimetric Diversity in Type Ia Supernovae», *Astrophysical Journal*, vol. 632, pp. 450–475, Oct. 2005. [66](#), [67](#)
- [180] Wang L., Baade D., Höflich P., et al., «Spectropolarimetry of SN 2001el in NGC 1448: Asphericity of a Normal Type Ia Supernova», *Astrophysical Journal*, vol. 591, pp. 1110–1128, July 2003. [67](#)
- [181] Chornock R. and Filippenko A. V., «Deviations from Axisymmetry Revealed by Line Polarization in the Normal Type Ia Supernova 2004S», *Astronomical Journal*, vol. 136, pp. 2227–2237, Dec. 2008. [67](#)
- [182] Wang L., Baade D., Höflich P., et al., «Premaximum Spectropolarimetry of the Type Ia SN 2004dt», *Astrophysical Journal*, vol. 653, pp. 490–502, Dec. 2006. [67](#)
- [183] Serkowski K., «Interstellar Polarization (review)», in *Interstellar Dust and Related Topics* (Greenberg J. M. and van de Hulst H. C., eds.), vol. 52 of *IAU Symposium*, p. 145, 1973. [67](#)
- [184] Patat F., Baade D., Höflich P., et al., «VLT spectropolarimetry of the fast expanding type Ia SN 2006X», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 508, pp. 229–246, Dec. 2009. [67](#)
- [185] Chornock R., Marion G. H., Calkins M., et al., «Supernova 2012bh in UGC 7228», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 3066, p. 1, Mar. 2012. [68](#)
- [186] Chornock R., Marion G. H., Calkins M., et al., «Pan-STARRS1 MDS Early Discovery of a SN Ia in UGC 7228», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3997, p. 1, Mar. 2012. [68](#)

- [187] Gal-Yam A., Ben-Ami S., Arcavi I., et al., «PTF SN discovery report, July 2012», *The Astronomer's Telegram*, vol. 4293, p. 1, Aug. 2012. [68](#)
- [188] Blinnikov S. I., Röpke F. K., Sorokina E. I., et al., «Theoretical light curves for deflagration models of type Ia supernova», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 453, pp. 229–240, July 2006. [69](#)
- [189] Schlafly E. F. and Finkbeiner D. P., «Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD», *Astrophysical Journal*, vol. 737, p. 103, Aug. 2011. [69](#)
- [190] Burstein D. and Heiles C., «Reddenings derived from H I and galaxy counts - Accuracy and maps», *Astronomical Journal*, vol. 87, pp. 1165–1189, Aug. 1982. [69](#)
- [191] Markkanen T., «Polarization measurements and extinction near the north galactic pole», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 74, pp. 201–205, Apr. 1979. [69](#)
- [192] Granot J., «The Most Probable Cause for the High Gamma-Ray Polarization in GRB 021206», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 596, pp. L17–L21, Oct. 2003. [71](#)
- [193] Lazzati D., Covino S., di Serego Alighieri S., et al., «Intrinsic and dust-induced polarization in gamma-ray burst afterglows: The case of GRB 021004», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 410, pp. 823–831, Nov. 2003. [72](#)
- [194] Masetti N., Palazzi E., Pian E., et al., «Optical and near-infrared observations of the GRB020405 afterglow», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 404, pp. 465–481, June 2003. [72](#)
- [195] Covino S., Ghisellini G., Lazzati D., et al., «Polarization of Gamma-Ray Burst Optical and Near-Infrared Afterglows», in *Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era* (Feroci M., Frontera F., Masetti N., et al., eds.), vol. 312 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 169, June 2004. [72](#), [73](#), [74](#)

- [196] Waxman E. and Draine B. T., «Dust Sublimation by Gamma-ray Bursts and Its Implications», *Astrophysical Journal*, vol. 537, pp. 796–802, July 2000. [72](#)
- [197] Perna R. and Lazzati D., «Time-dependent Photoionization in a Dusty Medium. I. Code Description and General Results», *Astrophysical Journal*, vol. 580, pp. 261–277, Nov. 2002. [72](#)
- [198] Sari R., Piran T., and Narayan R., «Spectra and Light Curves of Gamma-Ray Burst Afterglows», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 497, p. L17, Apr. 1998. [73](#)
- [199] Sari R. and Piran T., «Predictions for the Very Early Afterglow and the Optical Flash», *Astrophysical Journal*, vol. 520, pp. 641–649, Aug. 1999. [73](#)
- [200] Gruzinov A. and Waxman E., «Gamma-Ray Burst Afterglow: Polarization and Analytic Light Curves», *Astrophysical Journal*, vol. 511, pp. 852–861, Feb. 1999. [73](#)
- [201] Götz D., Laurent P., Lebrun F., et al., «Variable Polarization Measured in the Prompt Emission of GRB 041219A Using IBIS on Board INTEGRAL», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 695, pp. L208–L212, Apr. 2009. [74](#)
- [202] Yonetoku D., Murakami T., Gunji S., et al., «Detection of Gamma-Ray Polarization in Prompt Emission of GRB 100826A», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 743, p. L30, Dec. 2011. [74](#)
- [203] Yonetoku D., Murakami T., Gunji S., et al., «Magnetic Structures in Gamma-Ray Burst Jets Probed by Gamma-Ray Polarization», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 758, p. L1, Oct. 2012. [74](#)
- [204] Racusin J. L., Burrows D. N., D’Elia V., et al., «GRB 121011A: Swift detection of a burst with optical afterglow.», *GRB Coordinates Network*, vol. 13845, p. 1, 2012. [74](#)

- [205] Ohno M., Vianello G., Racusin J. L., et al., «GRB 121011A: Fermi-LAT detection of a burst.», *GRB Coordinates Network*, vol. 13859, p. 1, 2012. [74](#)
- [206] Xiong S., Byrne D., and Meegan C., «GRB 121011A: Fermi GBM observation.», *GRB Coordinates Network*, vol. 13860, p. 1, 2012. [74](#)
- [207] Yurkov V., Sergienko Y., Varda D., et al., «GRB 121011A: MASTER-net early OT light curve.», *GRB Coordinates Network*, vol. 13848, p. 1, 2012. [74](#)
- [208] Gorbovskoy E., Denisenko D., Krushinski V., et al., «GRB 121011A: MASTER-net bell light curve.», *GRB Coordinates Network*, vol. 13854, p. 1, 2012. [74](#), [77](#)
- [209] Lipunov V., «GRB 121011A: misprint in GCNC 13854.», *GRB Coordinates Network*, vol. 13861, p. 1, 2012. [74](#)
- [210] Thornton D., Stappers B., Bailes M., et al., «A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances», *Science*, vol. 341, pp. 53–56, July 2013. [80](#), [81](#), [86](#), [88](#), [89](#), [94](#)
- [211] Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A., et al., «A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin», *Science*, vol. 318, pp. 777–, Nov. 2007. [80](#)
- [212] Totani T., «Cosmological Fast Radio Bursts from Binary Neutron Star Mergers», *Publications of the ASJ*, vol. 65, p. L12, Oct. 2013. [80](#), [81](#), [86](#)
- [213] Lipunov V. M. and Panchenko I. E., «Pulsars revived by gravitational waves.», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 312, pp. 937–940, Aug. 1996. [80](#), [87](#), [89](#)
- [214] Hansen B. M. S. and Lyutikov M., «Radio and X-ray signatures of merging neutron stars», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 322, pp. 695–701, Apr. 2001. [80](#)

- [215] Lyutikov M., «The Electromagnetic Model of Short GRBs, the Nature of Prompt Tails, Supernova-less Long GRBs, and Highly Efficient Episodic Accretion», *Astrophysical Journal*, vol. 768, p. 63, May 2013. [80](#)
- [216] Lipunova G. V., «A burst of electromagnetic radiation from a collapsing magnetized star», *Astronomy Letters*, vol. 23, pp. 84–92, Jan. 1997. [80](#)
- [217] Lipunova G. V. and Lipunov V. M., «Formation of a gravitationally bound object after binary neutron star merging and GRB phenomena», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 329, pp. L29–L32, Jan. 1998. [80](#)
- [218] Lipunov V. M. and Gorbovskoy E. S., «Spinar paradigm and the central engine of gamma-ray bursts», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 383, pp. 1397–1412, Feb. 2008. [80](#)
- [219] Pshirkov M. S. and Postnov K. A., «Radio precursors to neutron star binary mergings», *Astrophysics and Space Science*, vol. 330, pp. 13–18, Nov. 2010. [80](#)
- [220] Lipunov V. and Gorbovskoy E., «An Extra Long X-Ray Plateau in a Gamma-Ray Burst and the Spinar Paradigm», *Astrophysical Journal Letters*, vol. 665, pp. L97–L100, Aug. 2007. [80](#)
- [221] Clark J. P. A., van den Heuvel E. P. J., and Sutantyo W., «Formation of neutron star binaries and their importance for gravitational radiation», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 72, pp. 120–128, Feb. 1979. [81](#), [83](#)
- [222] Hils D., Bender P. L., and Webbink R. F., «Gravitational radiation from the Galaxy», *Astrophysical Journal*, vol. 360, pp. 75–94, Sept. 1990. [81](#), [83](#)
- [223] Portegies Zwart S. F. and Spreeuw H. N., «The galactic merger-rate of (ns, ns) binaries. I. Perspective for gravity-wave detectors.», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 312, pp. 670–674, Aug. 1996. [81](#), [83](#), [85](#)
- [224] Fryer C. L., «Population Synthesis of GRB Progenitors: Problems With Kicks», in *Highly Energetic Physical Processes and Mechanisms for*

*Emission from Astrophysical Plasmas* (Martens P. C. H., Tsuruta S., and Weber M. A., eds.), vol. 195 of *IAU Symposium*, p. 339, May 2000. [81](#)

- [225] Bethe H. A. and Brown G. E., «Evolution of Binary Compact Objects That Merge», *Astrophysical Journal*, vol. 506, pp. 780–789, Oct. 1998. [81](#), [83](#), [84](#)
- [226] Portegies Zwart S. F. and Yungelson L. R., «Formation and evolution of binary neutron stars», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 332, pp. 173–188, Apr. 1998. [81](#), [83](#), [85](#)
- [227] Kalogera V. and Lorimer D. R., «An Upper Limit on the Coalescence Rate of Double Neutron-Star Binaries in the Galaxy», *Astrophysical Journal*, vol. 530, pp. 890–895, Feb. 2000. [81](#)
- [228] Belczynski K., Bulik T., and Kalogera V., «Merger Sites of Double Neutron Stars and Their Host Galaxies», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 571, pp. L147–L150, June 2002. [81](#), [83](#)
- [229] Kalogera V., Narayan R., Spergel D. N., et al., «The Coalescence Rate of Double Neutron Star Systems», *Astrophysical Journal*, vol. 556, pp. 340–356, July 2001. [81](#), [83](#)
- [230] Kim C., Bhakthi Pranama Perera B., and McLaughlin M. A., «Implications of PSR J0737-3039B for the Galactic NS-NS Binary Merger Rate», *ArXiv e-prints*, Aug. 2013. [81](#), [83](#)
- [231] Sari R., Piran T., and Halpern J. P., «Jets in Gamma-Ray Bursts», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 519, pp. L17–L20, July 1999. [81](#)
- [232] Coward D. M., Howell E. J., Piran T., et al., «The Swift short gamma-ray burst rate density: implications for binary neutron star merger rates», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 425, pp. 2668–2673, Oct. 2012. [81](#)
- [233] Kornilov V. G. and Lipunov V. M., «Neutron Stars in Massive Binary Systems - Part Two - Numerical Modeling», *Soviet Astronomy*, vol. 27, p. 334, June 1983. [81](#)

- [234] Lipunov V. M., Postnov K. A., and Prokhorov M. E., «The sources of gravitational waves with continuous and discrete spectra», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 176, pp. L1–L4, Apr. 1987. [81](#), [83](#), [91](#)
- [235] Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E., et al., «Evolution of the Double Neutron Star Merging Rate and the Cosmological Origin of Gamma-Ray Burst Sources», *Astrophysical Journal*, vol. 454, p. 593, Dec. 1995. [81](#), [82](#), [83](#), [85](#), [89](#)
- [236] Lipunov V. M., Postnov K. A., and Prokhorov M. E., «Formation and coalescence of relativistic binary stars: the effect of kick velocity», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 288, pp. 245–259, June 1997. [81](#), [83](#), [84](#), [85](#), [90](#), [91](#)
- [237] Lipunov V. M., Postnov K. A., and Prokhorov M. E., «The Scenario Machine: restrictions on key parameters of binary evolution.», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 310, pp. 489–507, June 1996. [82](#), [84](#), [85](#), [91](#)
- [238] Kornilov V. G. and Lipunov V. M., «Collapse Anisotropy for Massive Stars», *Soviet Astronomy*, vol. 28, pp. 402–404, Aug. 1984. [82](#), [85](#)
- [239] Lipunov V. M., Nazin S. N., Osminkin E. Y., et al., «Binary radiopulsars with optical companion», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 282, pp. 61–72, Feb. 1994. [82](#)
- [240] Johnston S., Manchester R. N., Lyne A. G., et al., «PSR 1259-63 - A binary radio pulsar with a Be star companion», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 387, pp. L37–L41, Mar. 1992. [82](#)
- [241] Tatarintzeva V., Lipunov V., Osminkin E., et al., «New results of numerical simulations of X ray binaries evolution», in *Two Topics in X-Ray Astronomy, Volume 1: X Ray Binaries. Volume 2: AGN and the X Ray Background* (Hunt J. and Battrick B., eds.), vol. 296 of *ESA Special Publication*, pp. 653–656, Nov. 1989. [82](#)
- [242] Lipunov V. M. and Postnov K. A., «The joint evolution of normal and compact magnetized stars in close binaries - Analytical description and

- statistical simulation», *Astrophysics and Space Science*, vol. 145, pp. 1–45, June 1988. [82](#)
- [243] Lehmer B. D., Brandt W. N., Alexander D. M., et al., «The X-Ray Evolution of Early-Type Galaxies in the Extended Chandra Deep Field-South», *Astrophysical Journal*, vol. 657, pp. 681–699, Mar. 2007. [82](#)
- [244] Lipunov V. M., Ozernoy L. M., Popov S. B., et al., «Population Synthesis of X-Ray Sources at the Galactic Center», *Astrophysical Journal*, vol. 466, p. 234, July 1996. [82](#)
- [245] Phinney E. S., «The rate of neutron star binary mergers in the universe - Minimal predictions for gravity wave detectors», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 380, pp. L17–L21, Oct. 1991. [83](#)
- [246] Narayan R., Paczynski B., and Piran T., «Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 395, pp. L83–L86, Aug. 1992. [83](#)
- [247] Tutukov A. V. and Iungel'Son L. R., «The merger rate of neutron star and black hole binaries», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 260, pp. 675–678, Feb. 1993. [83](#)
- [248] Iben Jr. I., Tutukov A. V., and Yungelson L. R., «A Model of the Galactic X-Ray Binary Population. I. High-Mass X-Ray Binaries», *Astrophysical Journal, Supplement*, vol. 100, p. 217, Sept. 1995. [83](#)
- [249] Curran S. J. and Lorimer D. R., «Pulsar Statistics - Part Three - Neutron Star Binaries», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 276, p. 347, Sept. 1995. [83](#)
- [250] van den Heuvel E. P. J. and Lorimer D. R., «On the galactic and cosmic merger rate of double neutron stars.», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 283, pp. L37–L40, Nov. 1996. [83](#)
- [251] Stairs I. H., Arzoumanian Z., Camilo F., et al., «Measurement of Relativistic Orbital Decay in the PSR B1534+12 Binary System», *Astrophysical Journal*, vol. 505, pp. 352–357, Sept. 1998. [83](#)

- [252] Arzoumanian Z., Cordes J. M., and Wasserman I., «Pulsar Spin Evolution, Kinematics, and the Birthrate of Neutron Star Binaries», *Astrophysical Journal*, vol. 520, pp. 696–705, Aug. 1999. [83](#)
- [253] Fryer C. and Kalogera V., «Double Neutron Star Systems and Natal Neutron Star Kicks», *Astrophysical Journal*, vol. 489, p. 244, Nov. 1997. [83](#), [85](#)
- [254] Burgay M., D’Amico N., Possenti A., et al., «An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system», *Nature*, vol. 426, pp. 531–533, Dec. 2003. [83](#)
- [255] Kalogera V., Kim C., Lorimer D. R., et al., «The Cosmic Coalescence Rates for Double Neutron Star Binaries», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 601, pp. L179–L182, Feb. 2004. [83](#), [90](#)
- [256] Chevalier R. A., «Neutron star accretion in a stellar envelope», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 411, pp. L33–L36, July 1993. [84](#)
- [257] Lyne A. G. and Lorimer D. R., «High birth velocities of radio pulsars», *Nature*, vol. 369, pp. 127–129, May 1994. [85](#), [91](#)
- [258] Brandt N. and Podsiadlowski P., «The effects of high-velocity supernova kicks on the orbital properties and sky distributions of neutron-star binaries», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 274, pp. 461–484, May 1995. [85](#)
- [259] Iben Jr. I. and Tutukov A. V., «On the Origin of the High Space Velocities of Radio Pulsars», *Astrophysical Journal*, vol. 456, p. 738, Jan. 1996. [85](#)
- [260] Hansen B. M. S. and Phinney E. S., «The pulsar kick velocity distribution», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 291, p. 569, Nov. 1997. [85](#)
- [261] Arzoumanian Z., Cordes J. M., and Chernoff D., «The Unbiased Velocity Distribution of Neutron Stars from a Simulation of Pulsar Surveys», in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, vol. 29

of *Bulletin of the American Astronomical Society*, p. 113.08, Dec. 1997. [85](#)

- [262] Fryer C., Burrows A., and Benz W., «Population Syntheses for Neutron Star Systems with Intrinsic Kicks», *Astrophysical Journal*, vol. 496, p. 333, Mar. 1998. [85](#)
- [263] Cordes J. M. and Chernoff D. F., «Neutron Star Population Dynamics. II. Three-dimensional Space Velocities of Young Pulsars», *Astrophysical Journal*, vol. 505, pp. 315–338, Sept. 1998. [85](#)
- [264] Blaauw A. and Ramachandran R., «Local pulsars: a note on the birth-velocity distribution.», *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 19, pp. 19–33, Dec. 1998. [85](#)
- [265] Arzoumanian Z., Chernoff D. F., and Cordes J. M., «The Velocity Distribution of Isolated Radio Pulsars», *Astrophysical Journal*, vol. 568, pp. 289–301, Mar. 2002. [85](#), [91](#)
- [266] Hopkins A. M. and Beacom J. F., «On the Normalization of the Cosmic Star Formation History», *Astrophysical Journal*, vol. 651, pp. 142–154, Nov. 2006. [85](#), [86](#)
- [267] Cole S., Norberg P., Baugh C. M., et al., «The 2dF galaxy redshift survey: near-infrared galaxy luminosity functions», *Monthly Notices of the RAS*, vol. 326, pp. 255–273, Sept. 2001. [86](#)
- [268] Salpeter E. E., «The Luminosity Function and Stellar Evolution.», *Astrophysical Journal*, vol. 121, p. 161, Jan. 1955. [86](#), [87](#), [88](#), [89](#), [93](#)
- [269] Baldry I. K. and Glazebrook K., «Constraints on a Universal Stellar Initial Mass Function from Ultraviolet to Near-Infrared Galaxy Luminosity Densities», *Astrophysical Journal*, vol. 593, pp. 258–271, Aug. 2003. [86](#), [87](#), [88](#), [93](#)
- [270] Bouwens R. J., Thompson R. I., Illingworth G. D., et al., «Galaxies at  $z \sim 7-8$ :  $z_{850}$ -Dropouts in the Hubble Ultra Deep Field», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 616, pp. L79–L82, Dec. 2004. [86](#)

- [271] Bouwens R. J., Illingworth G. D., Thompson R. I., et al., «Constraints on  $z \sim 10$  Galaxies from the Deepest Hubble Space Telescope NICMOS Fields», *Astrophysical Journal, Letters*, vol. 624, pp. L5–L8, May 2005. [86](#)
- [272] Bouwens R. and Illingworth G., «Luminosity functions and star formation rates at  $z \sim 6$ –10: Galaxy buildup in the reionization age», *New Astronomy Review*, vol. 50, pp. 152–156, Mar. 2006. [86](#)
- [273] Lipunov V. M., Börner G., and Wadhwa R. S., *Astrophysics of Neutron Stars*. 1992. [89](#), [90](#)
- [274] Belczynski K., Kalogera V., Rasio F. A., et al., «Compact Object Modeling with the StarTrack Population Synthesis Code», *Astrophysical Journal, Supplement*, vol. 174, pp. 223–260, Jan. 2008. [90](#)
- [275] Lorimer D. R., «Binary and Millisecond Pulsars», *Living Reviews in Relativity*, vol. 11, p. 8, Nov. 2008. [92](#)
- [276] van Leeuwen J., ed., *Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years*, vol. 291 of *IAU Symposium*, Mar. 2013. [92](#)
- [277] Ferdman R. D., Stairs I. H., Kramer M., et al., «The Double Pulsar: Evidence for Neutron Star Formation without an Iron Core-collapse Supernova», *Astrophysical Journal*, vol. 767, p. 85, Apr. 2013. [92](#)
- [278] Abadie J., Abbott B. P., Abbott R., et al., «Search for gravitational waves from low mass compact binary coalescence in LIGO’s sixth science run and Virgo’s science runs 2 and 3», *Physical Review D*, vol. 85, p. 082002, Apr. 2012. [92](#), [93](#)
- [279] Lipunov V. M., Postnov K. A., and Prokhorov M. E., «First LIGO events: binary black holes mergings», *New Astronomy*, vol. 2, pp. 43–52, May 1997. [93](#)

- [280] Tsvetkov D. Y., Balanutsa P., Gorbovskoy E., et al., «The Light Curves of Type Ia Supernova 2008gy», *Peremennye Zvezdy*, vol. 30, p. 3, May 2010. [99](#)
- [281] Lipunov V. M., Kryachko T., and Korotkiy S., «Supernova 2008gy», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 1565, p. 1, Nov. 2008. [99](#)
- [282] Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A., et al., «Supernovae 2009dz-2009ed», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 1792, p. 1, May 2009. [99](#)
- [283] Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A. A., et al., «CRTS Candidate Supernovae», *The Astronomer's Telegram*, vol. 2029, p. 1, Apr. 2009. [99](#)
- [284] Silverman J. M., Filippenko A. V., and Foley R. J., «Supernova 2009iz in UGC 2175», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 1947, p. 2, Sept. 2009. [99](#)
- [285] Briggs D., «Supernova 2009jr in IC 1320», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 1964, p. 1, Oct. 2009. [99](#)
- [286] Silverman J. M., Kleiser I. K. W., Griffith C. V., et al., «Supernova 2009kk», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 1991, p. 2, Oct. 2009. [99](#)
- [287] Jewett L., Choi J., Cenko S. B., et al., «Supernova 2009li in IC 1549», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2026, p. 1, Nov. 2009. [99](#)
- [288] Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A., et al., «Supernova 2009lv», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2045, p. 1, Nov. 2009. [99](#)
- [289] Drake A. J., Mahabal A., Djorgovski S. G., et al., «Supernovae 2009nc-2009nj», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2101, p. 1, Dec. 2009. [99](#)
- [290] Belinski A., Gorbovskoy E., Lipunov V., et al., «GRB 091127: MASTER early optical transient polarimetry.», *GRB Coordinates Network*, vol. 10203, p. 1, 2009. [99](#)

- [291] Nakano S. and Yusa T., «Supernova 2009mh in NGC 3839», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2074, p. 1, Dec. 2009. [99](#)
- [292] Griffith C. V., Kong J. J., Kleiser I. K. W., et al., «Supernova 2009mv», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2092, p. 2, Dec. 2009. [99](#)
- [293] Tsvetkov D. Y., Balanutsa P. V., Lipunov V. M., et al., «Photometric observations of the supernova 2009nr», *Astronomy Letters*, vol. 37, pp. 775–782, 2011. [99](#)
- [294] Green D. W. E., «Supernova 2009nr in UGC 8255», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2111, p. 1, Jan. 2010. [99](#)
- [295] Li W., Cenko S. B., and Filippenko A. V., «Supernovae 2009mx and 2009my», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2095, p. 1, Dec. 2009. [99](#)
- [296] Lipunov V., Nissinen M., Hentunen V.-P., et al., «Supernova 2010V in Pgc 51710», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2162, p. 1, Feb. 2010. [99](#)
- [297] Cox L., Puckett T., and Orff T., «Supernova 2010ag in UGC 10679», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2195, p. 1, Mar. 2010. [99](#)
- [298] Caldwell J., «Supernova 2010ai», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2200, p. 2, Mar. 2010. [99](#)
- [299] Rex J., Cenko S. B., Li W., et al., «Supernova 2010ak in MCG +03-41-142», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2203, p. 1, Mar. 2010. [99](#)
- [300] Orff T., Newton J., and Puckett T., «Supernova 2010at in MCG +13-09-10», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2216, p. 1, Mar. 2010. [99](#)
- [301] Prieto J. and Filippenko A. V., «Supernova 2010ay», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2224, p. 3, Mar. 2010. [99](#)

- [302] Catelan M., Drake A. J., Djorgovski S. G., et al., «Supernovae 2010az and 2010ba», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2225, p. 1, Mar. 2010. [99](#)
- [303] Bishop D., «Supernova 2010cr in NGC 5177», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2281, p. 2, May 2010. [99](#)
- [304] Balanutsa P. and Gorbovskoy E., «Supernova 2010db», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2290, p. 1, May 2010. [99](#)
- [305] Shumkov V., Balanutsa P., and Gorbovskoy E., «Supernova 2010ea», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2320, p. 1, June 2010. [99](#)
- [306] Nakano S. and Yusa T., «Supernova 2010dn in NGC 3184», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2299, p. 1, June 2010. [99](#)
- [307] Vinko J., Marion G. H., Wheeler J. C., et al., «2010dn in NGC 3184», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2300, p. 1, June 2010. [99](#)
- [308] Berger E., «HST/Spitzer limits on the progenitor of SN2010dn in NGC3184», *The Astronomer's Telegram*, vol. 2655, p. 1, June 2010. [99](#)
- [309] Hoffman D., Cutri R. M., Kasliwal M. M., et al., «WISE Detections of Luminous Red Novae», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3160, p. 1, Feb. 2011. [99](#)
- [310] Guerrini G., «Supernova 2010ho», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2445, p. 1, Sept. 2010. [99](#)
- [311] Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A., et al., «Supernovae 2010hm, 2010ht, and 2010hu», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2455, p. 1, Sept. 2010. [99](#)
- [312] Lin K., Li W., Cenko S. B., et al., «Supernova 2010ie in NGC 2333», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2468, p. 1, Sept. 2010. [99](#)
- [313] Balanutsa P., Gorbovskoy E., Lipunov V., et al., «MASTER SN candidate in UGC03552», *The Astronomer's Telegram*, vol. 2960, p. 1, Oct. 2010. [100](#)

- [314] Balanutsa P., Gorbovskoy E., Lipunov V., et al., «MASTER SN candidate in PGC066672», *The Astronomer's Telegram*, vol. 2973, p. 1, Oct. 2010. [100](#)
- [315] Balanutsa P., Gorbovskoy E., Lipunov V., et al., «MASTER SN candidate in UGC04543», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3009, p. 1, Nov. 2010. [100](#)
- [316] Lipunov V., «Corrections to publications SN candidates in UGC04543 and UGC0595», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3016, p. 1, Nov. 2010. [100](#)
- [317] Balanutsa P., Gorbovskoy E., Lipunov V., et al., «MASTER SN candidate in UGC0595», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3015, p. 1, Nov. 2010. [100](#)
- [318] Zheng W., Vinko J., Quimby R., et al., «Supernova 2010ke», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2557, p. 1, Nov. 2010. [100](#)
- [319] Fatkhullin T. A., Komarova V. N., Moskvitin A. S., et al., «Supernovae 2010kj and 2010kk», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2566, p. 1, Dec. 2010. [100](#)
- [320] Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A., et al., «Supernovae 2010kl and 2010ky-2010lk», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2601, p. 1, Dec. 2010. [100](#)
- [321] Balanutsa P., Gorbovskoy E., Lipunov V., et al., «MASTER 120939.35+560917.3 - SN candidat discovery», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3122, p. 1, Jan. 2011. [100](#)
- [322] Balanutsa P., Gorbovskoy E., Lipunov V., et al., «MASTER SN candidate in SDSSJ124138.20+474742.9 discovery», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3084, p. 1, Dec. 2010. [100](#)
- [323] Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A., et al., «Supernovae 2010lx, 2010ly, 2010lz, and 2011P-2011S», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2645, p. 1, Feb. 2011. [100](#)

- [324] Zheng W., Vinko J., Quimby R., et al., «Supernova 2011ad», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2657, p. 1, Feb. 2011. [100](#)
- [325] Kudelina I., Gorbovskoy E., Balanutsa P., et al., «MASTER bright SN candidate in PGC021381 and PGC021386 discovery», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3164, p. 1, Feb. 2011. [100](#)
- [326] Shumkov V., Gorbovskoy E., Balanutsa P., et al., «MASTER SN candidate in PGC2440228 discovery», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3197, p. 1, Feb. 2011. [100](#)
- [327] Boles T., Buczynski D., James N., et al., «Supernova 2011az in IC 3862 = Psn J12535343+3605193», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2680, p. 1, Mar. 2011. [100](#)
- [328] Marion G. H., «Supernova 2011bk = PSN J16203475+2112082.», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2693, p. 2, Apr. 2011. [100](#)
- [329] Shumkov V., Gorbovskoy E., Balanutsa P., et al., «MASTER SN candidate in PGC2128586 discovery», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3213, p. 1, Mar. 2011. [100](#)
- [330] Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A., et al., «Supernovae 2011R and 2011bs-2011bx», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2704, p. 2, Apr. 2011. [100](#)
- [331] Moiseev A. V., Gorbovskoy E., Balanutsa P., et al., «MASTER OT 082752.77+704606.0 discovery and 6 meter telescope follow-up spectroscopic observations», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3255, p. 1, Apr. 2011. [100](#)
- [332] Shumkov V., Gorbovskoy E., Balanutsa P., et al., «MASTER bright SN candidate in PGC045903 discovery», *The Astronomer's Telegram*, vol. 3312, p. 1, Apr. 2011. [100](#)
- [333] Newton J., Puckett T., Marion G. H., et al., «Supernova 2011ck in NGC 5425 = Psn J14004624+4826454», *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2722, p. 1, May 2011. [100](#)

- [334] Ahn S.-W., Lee K.-D., Kim J.-S., et al., «Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography », *Nanotechnology*, vol. 16, p. 1874, 2005. [102](#)
- [335] Buton C., Copin Y., Aldering G., et al., «Atmospheric extinction properties above Mauna Kea from the Nearby SuperNova Factory spectro-photometric data set», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 549, p. A8, Jan. 2013. [102](#)
- [336] Hayes D. S. and Latham D. W., «A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral-energy distribution of VEGA», *Astrophysical Journal*, vol. 197, pp. 593–601, May 1975. [102](#)
- [337] Bohlin R. C., «HST Stellar Standards with 1% Accuracy in Absolute Flux», in *The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization* (Sterken C., ed.), vol. 364 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 315, Apr. 2007. [102](#), [104](#)