

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2011

Измерение ускорения космического расширения по сверхновым

С. Перлмуттер

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2011 г.)

PACS numbers: 01.10.Fv, 95.36.+x, 97.60.Bw, 98.80.Es

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201310e.1060

Содержание

1. Введение (1060).
 2. Старый вопрос (1060).
 3. Сверхновые как маяки истории Вселенной (1060).
 4. Как началась наша работа (1061).
 5. Как можно найти сверхновые по требованию? (1062).
 6. Новые трудности (1064).
 7. Калан/Толлоу: новые уточнённые измерения сверхновых на малых красных смещениях (1066).
 8. Ещё одна проблема (1068).
 9. Неожиданная развязка (1069).
 10. Сцены десятилетия: импрессионистский набросок (1071).
 11. Слово благодарности (1077).
- Список литературы (1077).

1. Введение

Казалось бы, "открытие ускоренного расширения Вселенной" слетает с языка легко, но это не так, потому что путь, приведший к этому открытию, был долгим и тернистым. В данной лекции я хотел бы ознакомить читателя с некоторыми научными проблемами, с которыми мы сталкивались на протяжении десяти лет, предшествовавших этому открытию. Я в основном буду использовать оригинальные прозрачки для проектора, которыми мы пользовались в то время. Хотя они не так совершенны, как современная графика, мне представляется, что они дадут возможность почувствовать специфику научной работы того периода.

2. Старый вопрос

Проблема, решением которой мы занимались, стара как мир — возможно, уже первые люди, выйдя ночью из своих пещер и глядя на звёздное небо, могли задать себе следующий вопрос. Живём ли мы во Вселенной, которая всегда была такой, и останется ли она неизменной навсегда? Мне кажется, то, что такой вопрос мог возникнуть, почти является определением человека разумного.

С. Перлмуттер (S. Perlmutter). University of California, Berkeley, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA

На протяжении большей части истории человечества такие вопросы относились к чисто философским. И только в начале XX в. стала возможной научная формулировка этого вопроса. Отчасти это связано с созданием общей теории относительности (ОТО) А. Эйнштейна, которая дала инструменты, позволяющие думать о таких вещах на более строгом математическом языке. Отчасти также и с тем, что Эдвин Хаббл (Edwin Hubble) [1] в 1929 г. открыл расширение Вселенной, и мы стали более конкретно понимать термин "судьба Вселенной".

Наблюдения Хаббла показали, что мы живём не в статической Вселенной, а в расширяющемся космосе, в котором расстояния между галактиками со временем увеличиваются. Сразу же возникает вопрос — будет ли этот процесс продолжаться с неизменной скоростью или же он будет замедляться, так как всемирная гравитация должна тормозить всякое расширение. Можно даже представить себе, что гравитация в какой-то момент остановит расширение и Вселенная начнёт сжиматься. Это рано или поздно привело бы к Большому сжатию (Big Crunch), что означало бы конец существующей Вселенной.

Вопрос о будущем Вселенной возникает именно тогда, когда изучаешь историю Вселенной, процессы, происходившие миллиарды лет назад, и то, как замедлялось расширение Вселенной. Если замедление становится значительным, можно предположить, что расширение когда-нибудь сменится сжатием. Это стало ясно ещё в 1930-х гг., после открытия Хаббла астрономом Вальтеру Бааде (Walter Baade) и Фрицу Цвикки (Fritz Zwicky), занимавшимся изучением сверхновых. Они поняли, что, в принципе, можно использовать яркие взрывающиеся звёзды (сверхновые) для получения ответа на вопрос о будущем Вселенной. Я покажу, как это стало возможным.

3. Сверхновые как маяки истории Вселенной

Можно использовать видимый блеск сверхновой как индикатор расстояния до неё: чем он слабее, тем больше расстояние до источника — тем дальше шёл свет от него до нас. Таким образом, изучая более слабые сверхновые, мы как бы заглядываем всё дальше и дальше в прошлое. Можно также использовать цвет сверхновой: близкая сверхновая выглядит голубой звездой, а очень далёкая

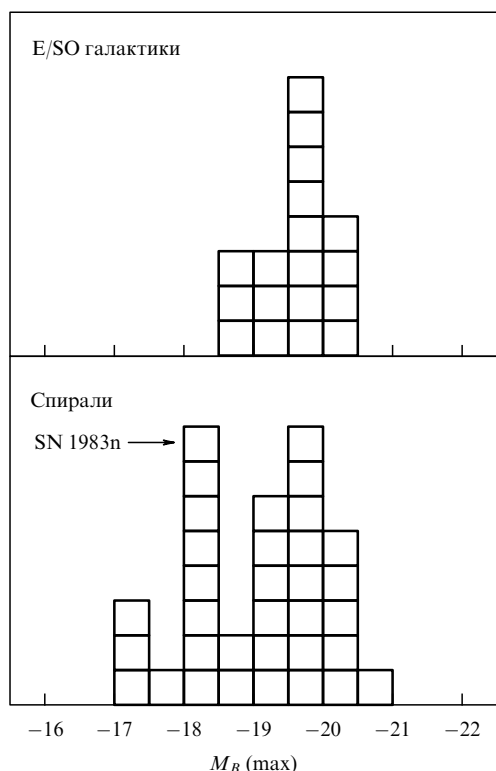


Рис. 1. Гистограмма абсолютных величин сверхновых. Рисунок из работы [4].

— красной. Мера покраснения спектра сверхновой говорит о том, насколько расширилась Вселенная с момента взрыва, потому что пока свет летел до нас, его длина волны растягивалась точно в той же пропорции, в какой увеличивался масштабный фактор расширяющейся Вселенной. Поэтому наблюдения далёких источников дают возможность начертить график зависимости расширения Вселенной от времени. В принципе, наблюдая достаточно много сверхновых и откладывая их на таких графиках, можно определить, как изменялось расширение Вселенной в прошлом, и предсказать его поведение в будущем.

Бааде обсуждал такую возможность ещё в 1930-х гг. [2]. Проблема, однако, была в том, что сверхновые, которые были известны в то время, не являлись "стандартными свечами", они имели разную собственную светимость. Собственная яркость сверхновых различалась в 2–3 раза, поэтому использовать их для космологических целей в то время было практически невозможно. Именно в этом и состояла проблема на протяжении последующих почти 50 лет (см. [3] об истории этой проблемы).

4. Как началась наша работа

В середине 1980-х гг. произошли два события, которые заинтересовали меня и других исследователей этой задачей. Первое — понимание того, что сверхновые можно разделить на подклассы. В середине 1980-х гг. был выделен подкласс сверхновых типа Ia [4–6]. Становилось ясно, что именно сверхновые этого подкласса являются более стандартными, чем другие. Например, гистограмма распределения яркости сверхновых из статьи Нино Панагия [4] показывала, что сверхновые,

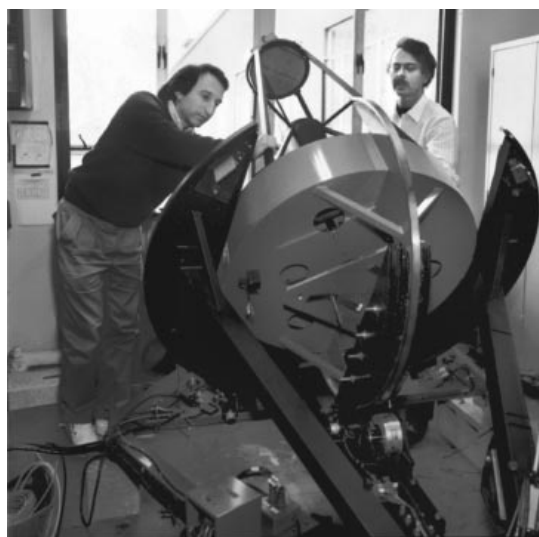


Рис. 2. Сол Перлмуттер и Ричард Мюллер с новым автоматическим телескопом, который группа установила в Обсерватории Лейхнера (впоследствии он использовался в другом месте для других задач).

обнаруживаемые в спиральных галактиках, сильно различаются по яркости, а разброс яркости сверхновых в эллиптических галактиках значительно меньше (рис. 1). Отсюда следовало, что в эллиптических галактиках, по-видимому, вспыхивают почти одинаковые сверхновые, а в спиральных галактиках — нет, к тому же в спиральных галактиках много пыли, которая увеличивает разброс при определении расстояний по видимому блеску. Появление подкласса сверхновых с одинаковой собственной яркостью означало, что можно вернуться к оригинальной идее Бааде и Цвикки и использовать эти источники для космологических целей.

Другое знаменательное событие в середине 1980-х гг. состояло в том, что в астрономии для регистрации изображений стали применяться ПЗС-матрицы, наподобие тех, которые используются в современных видеокамерах. Эти матрицы стали внедряться в астрономические наблюдения уже в начале 1980-х гг., и я участвовал в одном из первых проектов, использующих ПЗС-матрицы. К тому же появились новые компьютеры, способные быстро обрабатывать цифровые изображения. Этот проект возглавлял научный руководитель моей кандидатской диссертации Ричард Мюллер (Richard Muller). Проект предполагал поиск и автоматическое детектирование близких сверхновых небольшим телескопом-роботом (рис. 2). Я разрабатывал программное обеспечение, с помощью которого из галактики со сверхновой вычиталось изображение галактики, в результате чего оставалось только изображение сверхновой (рис. 3). К концу

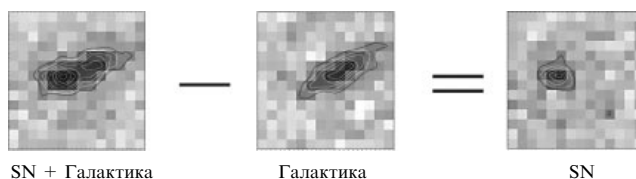


Рис. 3. Пример вычитания цифровых изображений. Из ПЗС-снимка сверхновой в галактике вычитается изображение хозяйской галактики до того, как в ней вспыхнула сверхновая (или после того, как блеск сверхновой уменьшился). Остаётся только изображение сверхновой.



Рис. 4. Изображение галактики до и после вспышки сверхновой, открытой в 1986 г. в нашем проекте Берклевского автоматического поиска сверхновых, возглавляемом проф. Ричардом Мюллером.

проекта с помощью автоматизированной техники мы открыли 20 сверхновых [7] (рис. 4).

Эти два события привели Карла Пеннипакера (Carl Pennypacker) и меня к идее попробовать вернуться к методу Бааде и Цвикки и измерить замедление расширения Вселенной по сверхновым. В то время (1987 г.) мы с Карлом работали в группе Рика Мюллера (я остался в группе на позиции постдока после защиты диссертации). При поддержке Рика мы стали разрабатывать проект, который выглядел многообещающе. Впрочем, мы отлично понимали, что это дело нелёгкое и предстоит большая работа. Ввиду больших трудностей, которые надо было преодолеть для достижения цели проекта, рецензенты и критики отнеслись к нему без особого энтузиазма. Но Карл по своей природе был человеком абсолютно неунывающим, и мы с оптимизмом продолжили своё дело. На практике это очень трудно найти далёкие сверхновые. Были и специфические конкретные проблемы, связанные с анализом слабых далёких сверхновых и сопоставлением их с более близкими источниками. Были вопросы по стандартизации блеска самих сверхновых и их эволюции со временем. Были и другие специфические детали, которые служили преградами на пути к достижению цели проекта (рис. 5)¹.

5. Как можно найти сверхновые по требованию?

Я постараюсь описать, как мы решали эти проблемы. Интересной особенностью наших измерений является простота идеи и её описания, поэтому трудности следует обсудить более подробно, чтобы стало понятно, каких усилий стоила успешная реализация этого проекта.

Прежде всего возникли следующие вопросы:

- сможем ли мы вообще открыть сверхновые, очень далёкие сверхновые,
- откроем ли мы их в достаточном количестве,
- откроем ли мы их на фазе роста блеска, чтобы измерить всю кривую блеска, включая максимум?

¹ В электронной версии Нобелевской лекции рисунки даны в цветном изображении (см. сайт УФН www.ufn.ru).

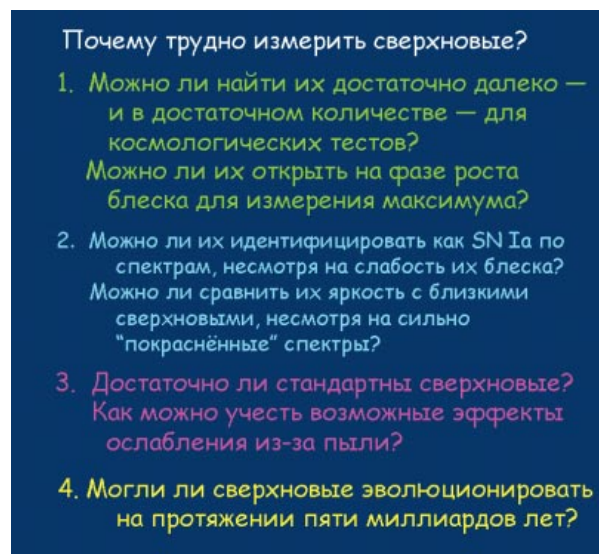


Рис. 5. Некоторые проблемы, которые нужно было решить для измерения торможения расширения Вселенной по наблюдениям сверхновых.

Проблемы

со сверхновыми типа Ia для космологических тестов

Редкие	~ 1 за 500 лет на галактику
Случайные	невозможно планировать наблюдения на телескопе заранее или во время полнолуния
Быстрые	трудно застать на фазе роста блеска

Рис. 6. Свойства SN Ia, из-за которых их трудно обнаруживать и измерять их кривые блеска.

Было известно, что именно яркость в максимуме блеска является стандартной свечой, поэтому наблюдения сверхновых через несколько недель после максимума были бы бесполезными. Это были очень серьёзные проблемы, потому что как инструмент для космологического исследования сверхновые — трудные объекты, они доставляют столько головной боли (рис. 6)! Появления сверхновых — это редкие явления: в отдельной галактике сверхновые типа Ia вспыхивают несколько раз в тысячу лет. Они случайно появляются на небе: заранее неизвестно, где произойдёт вспышка сверхновой. Они недолговечны, становятся яркими и тускнеют на временах порядка недель, так что требуется много времени для их наблюдений. Короче говоря, эти объекты очень неудобны для исследований.

Эти трудности стали отчётливо видны, когда позже мы узнали о результатах другого проекта, который начался немного раньше нашего. Ханс Нёргаард-Нильсен (Hans Nørgaard-Nielsen) с группой датских астрономов несколько лет пытались найти далёкие сверхновые типа Ia, но открыли только одну, и то спустя несколько недель после максимума блеска [8]. Поэтому, несмотря на то что факт существования очень далёких сверхновых нас вдохновлял, критики проекта заявляли, что он практически невыполним. Это была первая проблема.

Для решения этой проблемы мы выбрали подход, который подразумевал разработку возможности наблю-

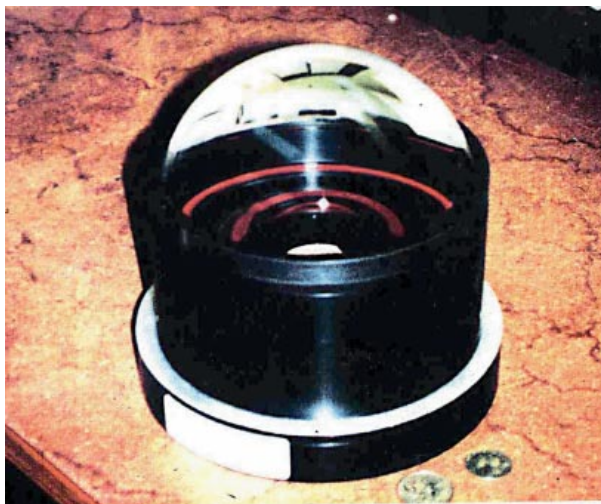


Рис. 7. Новая $F/1$ широкопольная ПЗС-камера, разработанная нами для 4-метрового Англо-австралийского телескопа (ААТ) для широкопольных обзоров с целью поиска сверхновых типа Ia на $z > 0,3$ в сотнях галактик на каждом снимке.

дать сразу много галактик (так как в среднем вспышку сверхновой типа Ia в одной галактике надо ждать 500 лет) и даже не одно скопление галактик (как делали датчане). Мы решили сконструировать широкопольную камеру, которая позволила бы в одной экспозиции делать снимок в 10–20 раз большего числа галактик, чем в одном скоплении. Нам пришлось разработать необычную оптическую систему (рис. 7), собирающую свет с большого поля зрения на маленькую ПЗС-матрицу. Этот новый прибор был установлен на Англо-австралийском 4-метровом телескопе. Он позволял нам работать на достаточно крупном инструменте с достаточно широким полем зрения и искать удалённые сверхновые одновременно в тысячах галактик.

С нашей широкопольной камерой на Англо-австралийском телескопе получались снимки, один из которых представлен на рис. 8а. На нём все светлые пятнышки представляют собой изображения галактик, в которых мы искали сверхновые. Затем через некоторое время та

же область снималась ещё раз (рис. 8б), и делалось вычитание одного снимка из другого. Если после вычитания оставался источник — это был кандидат в сверхновые. Разумеется, вся процедура делалась автоматически, поэтому требовалась разработка специального программного обеспечения. На рисунке 8в показан результат компьютерного вычитания изображений. На рисунке 9 можно видеть некоторых членов нашей группы в то время.

Казалось, что такой метод поиска сверхновых должен приносить результаты. Однако оставалось много проблем, потому что найденная сверхновая могла быть другого типа и для идентификации требовалось снять её спектр на крупном телескопе. Также требовалось скоординировать наблюдения на крупнейших мировых телескопах таким образом, чтобы следить за блеском сверхновой на фазе роста и на фазе уменьшения блеска с целью найти максимум. Разумеется, ни один комитет по распределению времени на телескопах не дал бы времени заранее за шесть месяцев, поскольку неизвестно, появится или нет сверхновая, скажем, 3 марта, когда вам выделено время для наблюдений. Марио Хамуй (Mario Hamuy) [9] при обсуждении Обзора близких сверхновых Калан/Тололо (Calan/Tololo) написал об этой проблеме так: "К сожалению, появление сверхновой непредсказуемо. Как следствие, невозможно *a priori* заказать наблюдения для её последующего мониторинга, поэтому мы вынуждены полагаться на чужое время на телескопе. Это несколько затрудняет выполнение данного проекта".

Итак, нам необходимо было придумать более систематический способ поиска сверхновых, и я разработал следующий план (рис. 10). На этом рисунке представлена стратегия наблюдений в течение одного лунного месяца. Суть была в том, что если получить первые снимки сразу после новолуния, подождать две с половиной недели или около того, а потом сделать повторные снимки той же области накануне следующего новолуния (а затем вычесть вторые снимки из первых), то в широкопольную камеру попадёт так много галактик, что гарантированно будет открыта не одна, а несколько сверхновых. Таким образом, к очередному новолунию получается статистически значимая выборка новых источников. Ещё одним

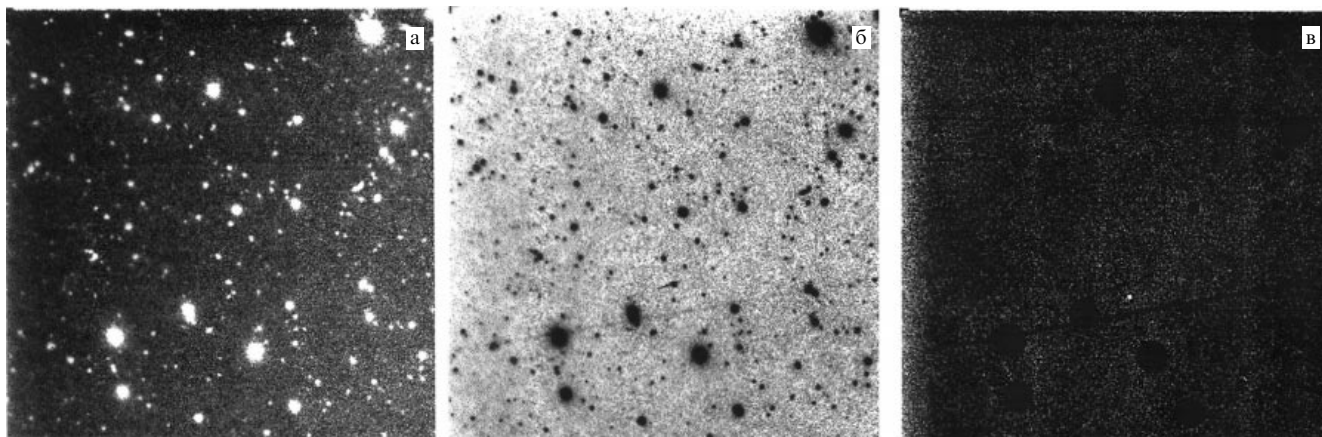


Рис. 8. (а) Снимок, сделанный нашей широкопольной камерой в ноябре 1989 г. на 4-метровом телескопе ААТ. Светлые пятнышки — удалённые галактики, в которых ищутся сверхновые. (б) Тот же участок неба, что и на рис. 8а, снятый в январе 1990 г. Негативное изображение, чтобы показать, что он будет вычитаться из первого. (в) Компьютерное вычитание изображения на рис. 8б из изображения на рис. 8а. Оставшийся источник выглядит как возможная сверхновая.



Рис. 9. Участники группы в 1992 г. обсуждают снимки со многими далёкими галактиками, полученные широкопольной камерой. Слева направо: Карл Пеннипакер, Сол Перлмуттер, Хейди Марвин Ньюберг, Герсон Голдхабер и Рик Мюллер.

Стратегия поиска Perlmutter et al. (1995)

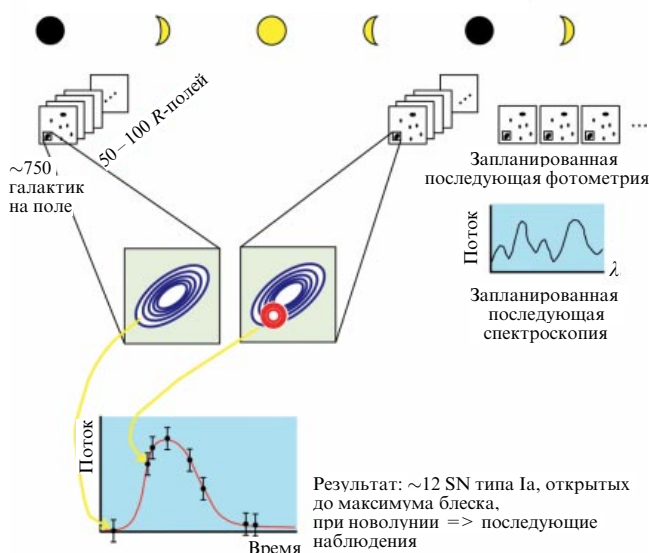


Рис. 10. (В цвете онлайн.) "Пакетная" стратегия наблюдений, которая гарантировала открытие сразу нескольких сверхновых с большими красными смещениями к конкретной дате (в частности, сразу перед новолунием) на фазе роста блеска [10]. Это позволяло заранее подавать заявки на большие телескопы в безлунное время для изучения формы кривой блеска сверхновых и спектроскопии.

достоинством этого метода был достаточно короткий временной интервал между последовательными снимками, который гарантировал наблюдение сверхновых на фазе роста блеска до максимума, так как возрастание блеска продолжается несколько недель, а убывание — несколько месяцев. Получается, что как раз к очередному новолунию, т.е. когда можно вести спектроскопические наблюдения, должен открываться не один новый источник, причём ещё на фазе роста блеска. Тогда можно планировать последующую спектроскопию кандидатов и фотометрию их кривых блеска.

Продемонстрировав, что эта стратегия действует, можно было подавать заявку для наблюдений на лучших телескопах мира, расположенных в Чили. Погода в Чили превосходна для астрономических наблюдений и можно не бояться, что дождь или облака помешают их выполнению. Когда мы впервые опробовали эту "пакет-

ную" наблюдательную стратегию, то решили отослать телеграммы в Международный астрономический союз (МАС) об открытии сверхновых для их последующего изучения другими астрономами. Известно, что МАС очень тщательно проверяет информацию для публикации в своих телеграммах, и я хотел быть уверенным, что нашу информацию смогут (и захотят) опубликовать. Я предупредил, что мы собираемся открывать полдюжины новых сверхновых каждые две недели. Это заявление было воспринято как шутка — никто не мог раньше предсказать появление сверхновой и уж, конечно, никто раньше не открывал сразу несколько сверхновых, так что моё заявление звучало несколько необычно. И действительно, в последующие годы мы слали множество таких телеграмм, так как новая техника наблюдений сверхновых отлично работала, и сверхновые открывались пачками. Таким образом, проблема систематических наблюдений сверхновых была решена.

6. Новые трудности

Следующая задача заключалась в определении подтипа открытой сверхновой — является ли она сверхновой типа Ia или нет. Было неясно, будут ли далёкие источники достаточно яркими для спектральной идентификации. Первые полученные нами спектры выглядели скорее как шум. Однако мы сообразили, что можно использовать необычность спектров сверхновых, в которых наблюдаются очень широкие линии в отличие от узких спектральных особенностей в спектрах звёзд и галактик. (Это связано с доплеровским уширением из-за огромной скорости разлёта оболочки сверхновой). Это означало, что можно вырезать все узкие линии и затем сгладить спектр с целью идентификации широких особенностей спектра сверхновой (рис. 11).

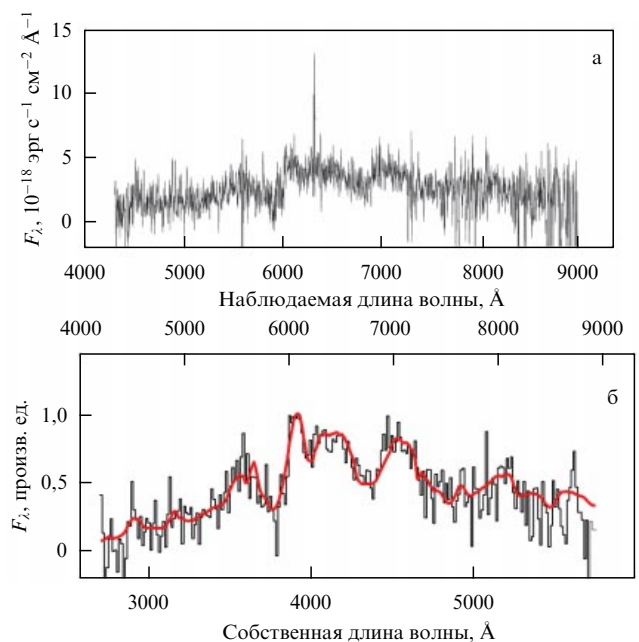


Рис. 11. (а) Спектр сверхновой с большим красным смещением. Из работы [11]. (б) (В цвете онлайн.) То же, что на рис. 11а после удаления узких спектральных линий и сглаживания континуума для выявления широких спектральных особенностей сверхновых. Красная жирная кривая прекрасно согласуется со спектром близкой сверхновой типа Ia, смещённым на $z = 0,55$.

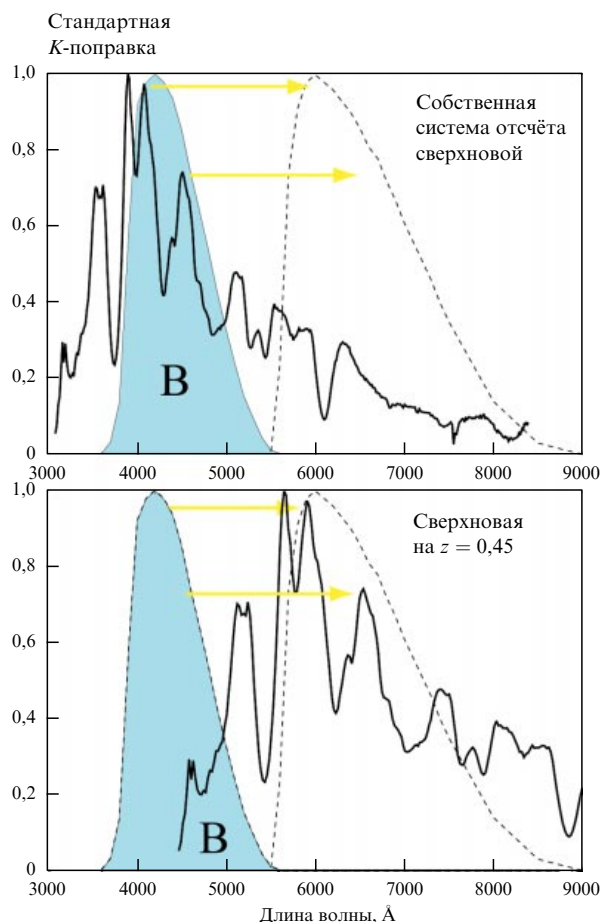


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Стандартная "K-поправка" вводится для учёта разности потока в данной полосе частот (здесь В-фильтр), принимаемого земным наблюдателем с нулевым красным смещением, и потока от источника с большим красным смещением, так как в наземный фильтр попадают разные участки спектра. Эти поправки были вычислены в работах [12, 13].

После успешного тестирования такой процедуры стало ясно, что мы сможем отождествлять спектры сверхновых на больших красных смещениях. Помогло также и то, что как раз в то время были введены в строй крупнейшие телескопы, в частности, телескоп им. Кека (Кеск), который разрабатывался как раз надо мной на верхнем этаже в лаборатории им. Лоуренса в Беркли, когда я был аспирантом. В то время я не подозревал, что буду проводить наблюдения на нём, но буквально через несколько лет (когда этот телескоп был окончательно отлажен) он оказался именно тем инструментом, который был нужен для выполнения нашего проекта.

Ещё одна проблема возникает из-за того, что спектр далёкой сверхновой смещается в красную сторону из-за расширения Вселенной ("красное смещение"). Спектр близкой сверхновой имеет максимум в голубых лучах, поэтому близкие сверхновые в основном изучаются в фильтре В ("В" от "blue", голубой). Но для далёкого источника в такой В-фильтр попадает только слабая часть УФ-спектра сверхновой (рис. 12). Вопрос в том, как сравнить поток от сверхновой в этой части спектра с потоком в максимуме спектра? Эта процедура сравнения называется K-поправкой, и было далеко не ясно, с какой точностью её можно рассчитать для очень далёких сверхновых. В работе Бруно Лейбундгута (Bruno Lei-

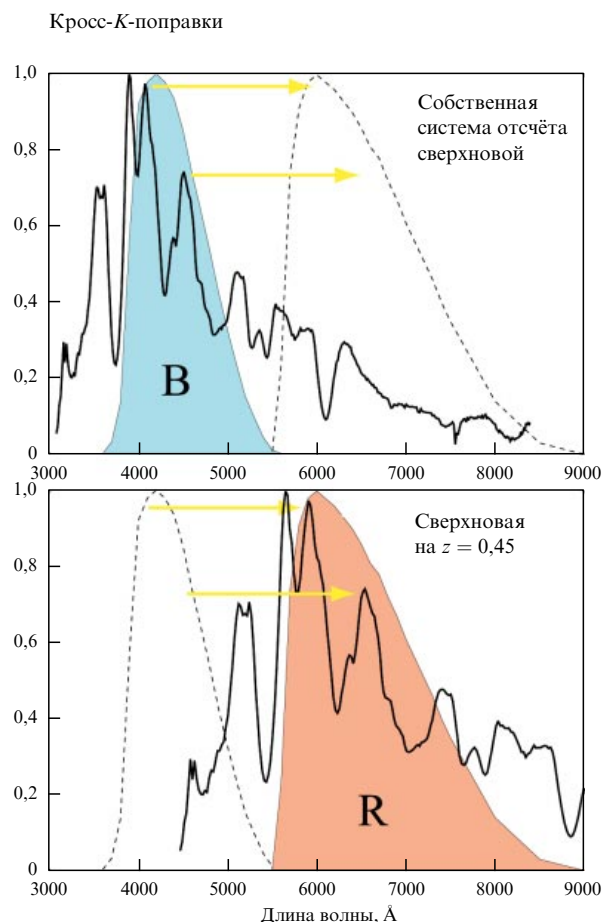


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Новые "кросс-K-поправки", рассчитанные в работе [14] для наблюдения сверхновых в красном фильтре (в данном примере — в полосе R), так что та часть спектра близкой сверхновой, которая попадала бы в фильтр В, от далёкой сверхновой попадает в фильтр R. Эти поправки существенно точнее, чем стандартные.

bundgut) [12] была рассчитана величина K-поправок для сверхновых типа Ia. Его расчёты были очень аккуратными, тем не менее неопределённости в этих поправках казались существенной проблемой.

В 1992 г. мы открыли первую сверхновую с большим красным смещением и проследили всю её кривую блеска. Она находилась на красном смещении $z = 0,45$. В процессе обработки выяснилось, что использование стандартных K-поправок даёт плохой результат. Вместо того чтобы наблюдать сверхновую в фильтре В, нужно было наблюдать её с помощью красного фильтра — в красной R-полосе. Для далёкой сверхновой в полосу R попадает как раз тот участок спектра, который наблюдается в фильтре В для близкого источника (рис. 13). Алекс Ким (Alex Kim), Ариэль Губар (Ariel Goobar) и я написали статью о применении метода "кросс-K-поправок", который позволил уменьшить неопределённости, возникающие при применении K-поправок только в одном фильтре [14] (см. также [15]).

Целый ряд проблем возникает при ответе на вопрос, насколько стандартными являются эти сверхновые. Можно ли их использовать как индикатор расстояния? В работах, упомянутых ранее, например [4], приводились сильные аргументы в пользу возможности использования SN Ia в качестве стандартных свечей. В конце

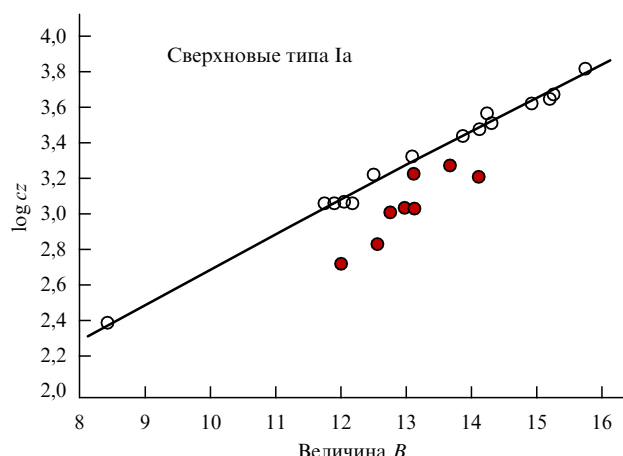


Рис. 14. (В цвете онлайн.) Одним из методов улучшения стандартизации сверхновых типа Ia, предложенным группой Дэвида Бранча из Оклахомы [21, 22], предлагалось удалить все красные сверхновые из выборки (изображены тёмными красными кружками). С помощью этой процедуры удалялись как сверхновые с покраснением, обусловленные пылью, так и пекулярные красные сверхновые типа Ia, что значительно уменьшало разброс точек на хаббловской диаграмме.

1980-х гг. и начале 1990-х гг. Бруно Лейбундгут [16] и Густав Тамман (Gustav Tammann) [17] убедительно показали, что все сверхновые типа Ia очень похожи друг на друга, поэтому важно упомянуть их имена в этом контексте. Также важно отметить работы группы Дэвида Бранча (David Branch) из Оклахомы [18–20], в которых были собраны известные кривые блеска сверхновых и было указано на лучшие способы их стандартизации по сравнению с известными ранее. Примером такого исследования может быть работа Вона (Vaughn) и др. [21], которую мы написали совместно с группой из Оклахомы. В ней было показано, что можно уменьшить дисперсию в оценках расстояний до сверхновых типа Ia путём исключения из выборки более красных сверхновых (рис. 14). Это позволило избавиться от сверхновых, которые казались более слабыми из-за поглощения на межзвёздной пыли (и при этом их цвет становился более красным), а также от пекулярных более красных по цвету сверхновых. Этот простой трюк позволил уменьшить дисперсию расстояний от 40–50 % до примерно 30 %. В работе [21] указывалось, что в получающуюся дисперсию расстояний входят ошибки наблюдений, и поскольку данные были далеко не идеальными, этот разброс в 30 % вполне мог объясняться ошибками наблюдений. Таким образом, казалось вполне вероятным, что сверхновые типа Ia могут быть отличными стандартными свечами, но для доказательства этого утверждения не хватало точности измерений.

7. Калан/Тололо: новые уточнённые измерения сверхновых на малых красных смещениях

В начале 1990-х гг. к поиску сверхновых присоединилась группа, проводившая обзор Калан/Тололо. Это оказалось решающим моментом во всей истории. Особо следует упомянуть имена Марио Хамуя, Хосе Маза (José Maza), Марка Филлипса (Mark Phillips) и Ника Санцеффа (Nick Suntzeff), возглавлявших эти исследования, так как благодаря им началась новая эра в изучении

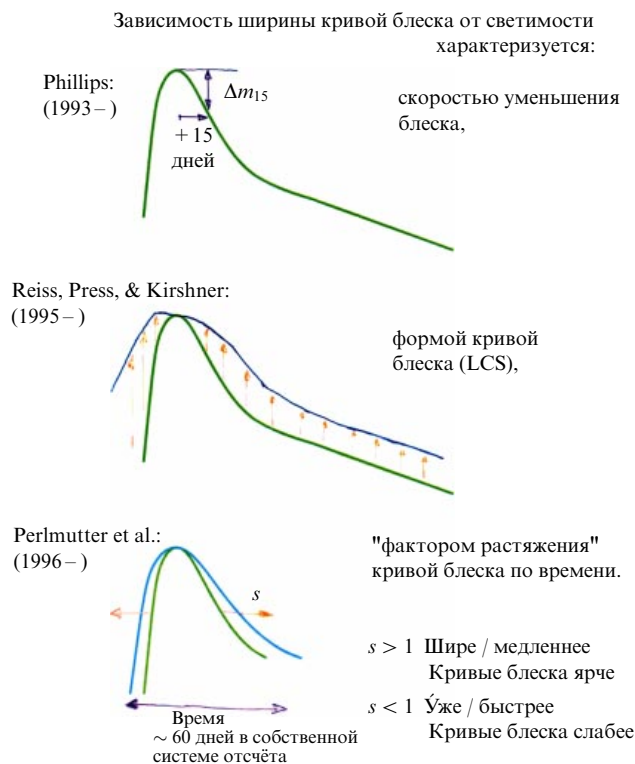


Рис. 15. (В цвете онлайн.) Альтернативные методы использования формы кривой блеска сверхновых для определения блеска в максимуме. Эти методы были развиты после установления зависимости скорости убывания блеска сверхновой от её светимости в максимуме [22].

сверхновых типа Ia. Выборка обнаруженных ими сверхновых включала объекты на относительно малых красных смещениях, но всё же достаточно далёкие для построения хаббловских диаграмм и уверенного измерения относительных расстояний [9, 23]. Используя точно такую же отсечку красных сверхновых, что и в работе Вона и др. [21], в этом лучше промеренном наборе сверхновых можно было уменьшить дисперсию расстояний до 18 %. Теперь эта точность позволяла делать космологические выводы, которые являлись целью нашего проекта.

В 1990-х гг. Марк Филлипс предложил другой подход к проблеме стандартизации сверхновых типа Ia, основанный на использовании формы кривых блеска: чем быстрее убывал блеск после максимума, тем меньше была абсолютная светимость сверхновой в максимуме блеска, и наоборот [24] (рис. 15). Марк вывел это свойство из анализа опубликованных данных о предыдущих сверхновых и ещё более отчётливо показал это на выборке сверхновых из обзора Калан/Тололо. Позднее Адам Рисс (Adam Riess) провёл более сложный статистический анализ их свойств, добавляя и вычитая средние кривые блеска [25]. Наша группа использовала третий метод измерения временных свойств кривых блеска, разработанный мной: просто растягивая или сжимая кривую блеска по времени на единый "фактор растяжения" [10, 26, 27] (см. также [28, 29]).

В этом методе можно было взять яркие/медленные и слабые/быстрые сверхновые Ia из обзора Калан/Тололо, и для каждой ввести свой фактор растяжения, который требовался для сведения всех кривых блеска воедино. Очевидно, этот фактор растяжения можно было исполь-

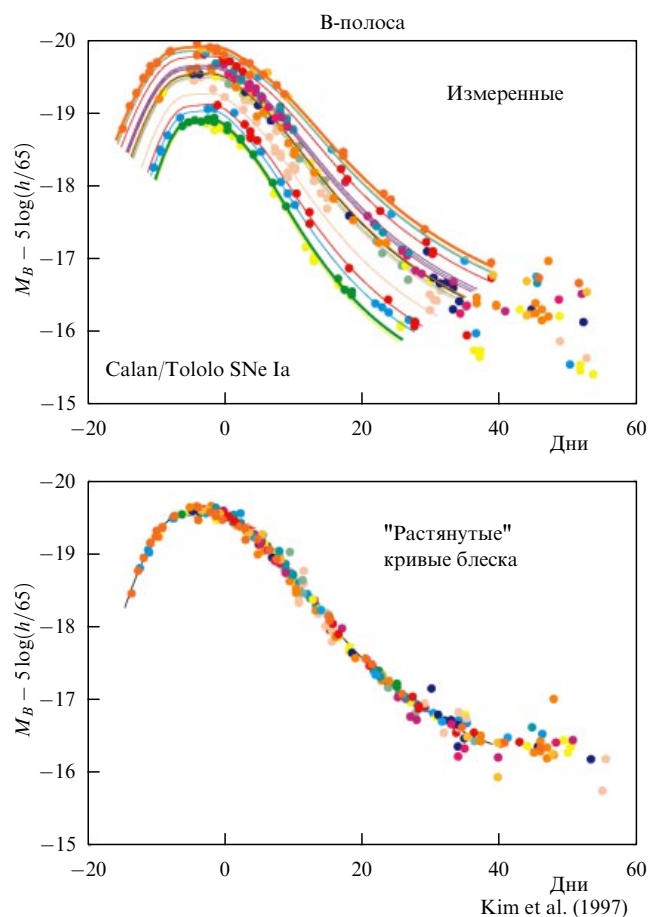


Рис. 16. (В цвете онлайн.) Каждую кривую блеска сверхновой типа Ia можно "откорректировать", увеличивая яркость для быстро убывающих кривых блеска (маленький "фактор растяжения") или уменьшая её для медленно убывающих (большой "фактор растяжения"), соответственно растягивая или сжимая временную шкалу. Внизу показан результат, полученный с использованием линейной зависимости между растяжением по времени и яркостью в максимуме.

зовать для определения абсолютной яркости каждой сверхновой. Действительно, "корректируя" каждую кривую блеска нужным образом, делая ярче более быстрые сверхновые и ослабляя более медленные, и при этом растягивая или сжимая временную шкалу, можно стандартизовать все кривые блеска, так чтобы они совпадали (рис. 16). Эти методы стандартизации кривых блеска и яркости сверхновых позволили ещё уменьшить разброс яркости сверхновых с 18 % до 12–15 %.

Что касается проблемы поглощения света сверхновой пылью на луче зрения, то, как я отметил выше, исключение красных сверхновых, предложенное в работе Вона и др. [21], не только устраняло действительно красные сверхновые, но и сверхновые, ослабленные (и покраснённые) пылью. Другой способ учёта эффектов поглощения межзвёздной пылью состоит в количественном измерении покраснения цвета сверхновой, по которому можно оценить ожидаемое поглощение. Было также обнаружено, что такая цветовая поправка может учесть некоторые внутренние зависимости цвет–светимость для сверхновых, которые очень похожи на эффекты, создаваемые пылью [30, 31]. Доказав работоспособность нашего метода пакетного открытия и последующего наблюдения сверхновых, мы могли подавать заявки на время наблюдений на крупных телескопах для

более точных измерений, которые требовались для выполнения задач нашего проекта.

Важным для учёта эффектов поглощения пылью оказался тот факт, что большинство сверхновых не подвержено их влиянию. В то время уже можно было проанализировать яркость и цвета близких сверхновых, которые, как оказалось, лежат в узком интервале. Это было бы не так, если бы эффекты поглощения пылью были существенными. А вот что действительно должно было быть проверено, так это наличие возможных различий в цветах близких и далёких сверхновых, связанных с поглощением пылью. Поэтому мы разработали два метода изучения цветовых эффектов пыли: можно было либо сравнивать распределения цветов близких и далёких сверхновых, либо же исправлять по отдельности блеск каждой сверхновой, используя наблюдаемый цвет как индикатор требуемой поправки. (В нашем анализе мы испробовали оба метода, так что эффекты пыли оказались надёжно учтены.)

Был ещё и третий метод учёта эффектов пыли, который мы стали обсуждать на конференциях как метод, пригодный для будущих наблюдений космологических сверхновых. На очень больших красных смещениях возможно отличить поглощение пылью от космологического ослабления блеска сверхновых, потому что на больших расстояниях возрастание величины поглощения пылью с увеличением расстояния происходит иначе, чем на близких. Чем дальше источник, тем его космологическое ослабление по сравнению с эффектами поглощения на межзвёздной пыли сильнее (рис. 17). В 1998 г. по наблюдениям на космическом телескопе им. Хаббла [32] мы открыли, спектроскопически подтвердили и измерили кривые блеска сверхновой на красном смещении 1,2 — первой сверхновой с $z > 1$. Мы её назвали "Альбиони" (см. рис. 17), и это был именно такой источник, который требовался для космологических тестов. Эта методика была затем применена Адамом Риссом и его коллегами при великолепных наблюдениях сверхновых на телескопе им. Хаббла [33].

Наконец, следовало проверить, не могут ли далёкие сверхновые отличаться от близких из-за эволюционных эффектов в течение миллиардов лет. Если такой эффект есть, то бессмысленно сравнивать яркость далёких и близких сверхновых, так как они перестают быть стандартными свечами. Наша группа нашла способ проверки

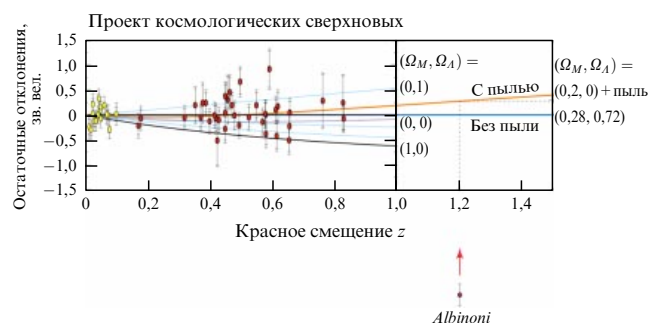


Рис. 17. (В цвете онлайн.) После открытия SN 1998eq [32] (названной "Альбиони") стало ясно, что можно открывать и спектроскопически подтверждать сверхновые на красном смещении, большем 1. Мы предположили, что измерения источников на таких больших красных смещениях позволят различить на хаббловских диаграммах эффекты поглощения света пылью и космологического ослабления.

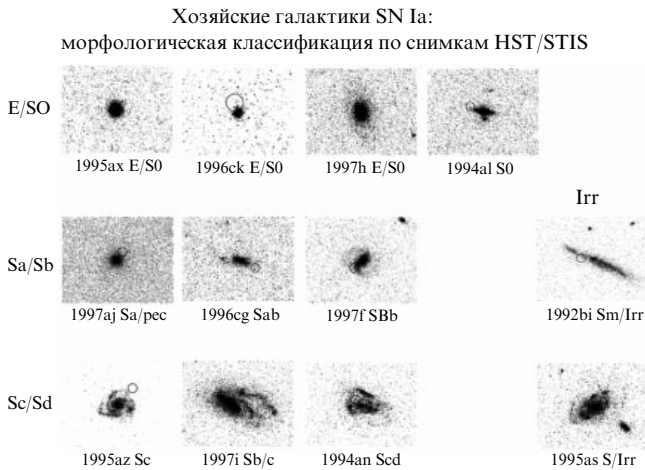


Рис. 18. Проводя космологические тесты по отдельным группам сверхновых в разных типах галактик, можно проверить, влияет ли различная эволюция галактик на свойства сверхновых на малых и больших красных смещениях. Эти тесты были предложены в работах [26, 27, 34] и проведены в несколько этапов. На рисунке из работы [35] показаны результаты по изучению морфологии хозяйских галактик сверхновых с космического телескопа им. Хаббла.

этой гипотезы: так же, как и близкие сверхновые, далёкие объекты можно разделить на группы, находящиеся в эллиптических и спиральных галактиках (рис. 18). Различные типы хозяйских галактик имеют совершенно разные эволюционные истории. Если космологические результаты, получаемые по сверхновым в разных типах галактик, согласуются друг с другом, это может служить убедительным свидетельством того, что эволюционное поведение сверхновых незначительно влияет на результат.

8. Ещё одна проблема

К 1994 г. мы ответили на ряд вопросов, перечисленных на рис. 5, относительно возможности использования сверхновых для космологических тестов. Но возникла новая проблема, приведённая на рис. 19. Мы стали о ней думать ещё в 1992 г., сразу после открытия первой сверхновой с большим красным смещением. Разумеется, одна сверхновая не могла быть использована для проверки космологической модели, но её измерение дало очень малое значение скорости торможения расширения Вселенной, а значит, и средней плотности вещества, гравитация кото-

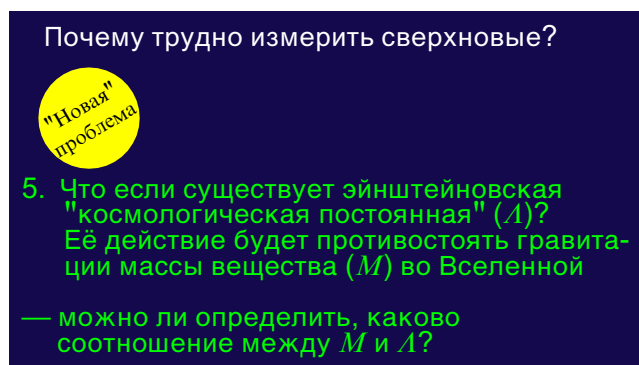


Рис. 19. К 1994 г. возникла новая проблема в измерении сверхновых вдобавок к четырём, перечисленным на рис. 5.

рого приводит к торможению расширения. На самом деле торможение было столь малым, что мы начали думать о "космологической постоянной", которую Эйнштейн ввёл в свои уравнения, описывающие расширение Вселенной. Известно, что после того, как Эйнштейн узнал о расширении Вселенной, он отказался от космологической постоянной. Но если бы она существовала, то её эффект сводился бы к компенсации гравитационного притяжения вещества, которое тормозит расширение. Нам было ясно, что полученное малое значение параметра торможения Вселенной могло свидетельствовать о наличии чего-то вроде космологической постоянной. Однако в ту пору невозможно было однозначно ответить на вопрос, является ли неожиданно малое значение параметра торможения следствием малой средней плотности вещества или же компенсационным эффектом космологической постоянной.

Эта проблема проиллюстрирована на рис. 20а из моей статьи с Ариэлем Губаром [36]. Пусть имеется

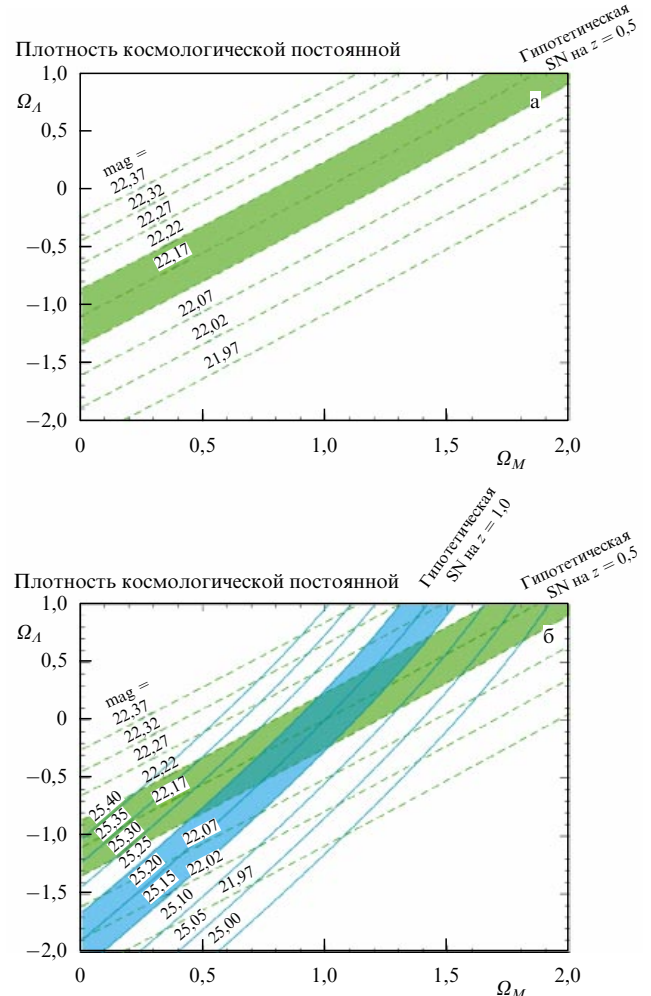


Рис. 20. (В цвете онлайн.) (а) Губар и Перлмуттер [36] использовали эту диаграмму, чтобы показать, что измерение сверхновой на $z = 0,5$ (гипотетической в то время) ограничило бы возможные значения плотностей вещества и космологической постоянной (зелёная полоса на рисунке). (б) Полосы возможных значений плотности космологической постоянной и плотности вещества для сверхновых на разных красных смещениях (голубая полоса — для сверхновой на $z = 1$). Пересечение полос для сверхновых с разными красными смещениями позволяет отдельно определить плотности вещества и космологической постоянной. (Также из работы [36].)

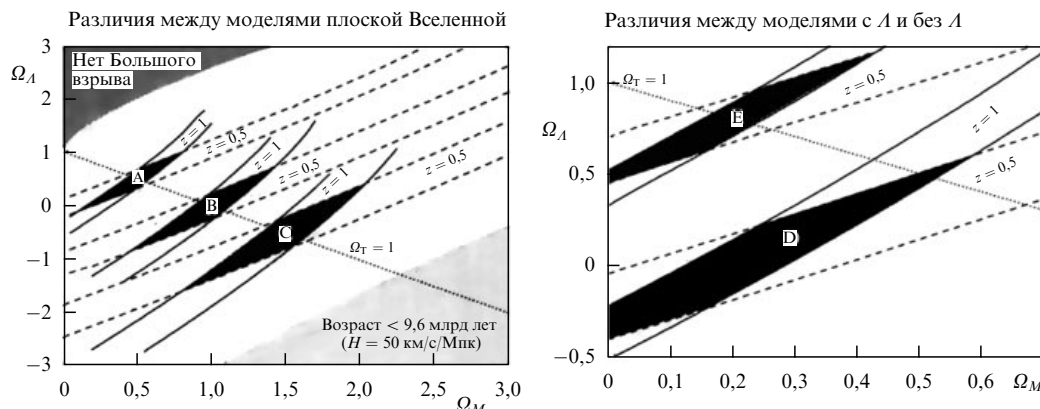


Рис. 21. В работе [36] рассмотрены различные космологические модели и показано, как по сверхновым на разных красных смещениях (например, с $z = 0,5$ и $z = 1$) можно разделить вклады вещества и космологической постоянной. Модели, показанные на правом графике, оказались особенно "прозорливыми" — ошибки для моделей с большой космологической постоянной меньше, поэтому её легче проверить с помощью наблюдений.

гипотетическая сверхновая, скажем, на $z = 0,5$ (тогда мы ещё не открыли такой источник). Можно найти такую комбинацию плотностей вещества и космологической постоянной, которая требуется для объяснения наблюдаемой яркости этой сверхновой. Получается некоторая полоса значений. По одному только этому графику нельзя сказать, какая модель описывает понижение яркости — с низкой плотностью и малой космологической постоянной (нижняя левая часть рисунка) или с большими значениями этих параметров (верхняя правая часть рисунка). Как мы поняли с Ариэлем, для сверхновых на $z = 1$ или ещё дальше полоса допустимых значений изменяет наклон (рис. 20б). Тогда пересечение этих полос для сверхновых с разными красными смещениями можно было бы использовать для разделения влияния плотностей вещества и космологической постоянной на скорость расширения Вселенной. На рисунке 21 представлен график из нашей работы, который показывает, что при заданной плотности вещества можно отличить модель с нулевой космологической постоянной, т.е. без космологической постоянной, от модели со значительной космологической постоянной. Интересно отметить, что значение космологической постоянной, которое мы выбрали для данного примера, оказалось очень близким к реально найденной позже величине. Разумеется, в то время мы ожидали получить ответ с нулевой космологической постоянной. (В самой работе мы отметили, что было бы легче измерить ненулевую космологическую постоянную, так как в этой области параметров ошибки измерений меньше.)

9. Неожданная развязка

Таким образом, в конце 1994 г. мы были готовы начать использовать методику пакетного обнаружения сверхновых на фазе роста блеска в каждом полугодии телескопного времени. Эта работа должна была быть поставлена на поток: нам хотелось провести как можно больше высокоточных многоцветных наблюдений сверхновых для статистически надёжного измерения скорости торможения расширения Вселенной. Для этого надо было подавать много заявок на телескопы по всему миру. Это было необходимо для открытия сверхновых (на 4-метровом телескопе Серро-Тололо (Cerro Tololo) в Чили)



Рис. 22. Встреча участников группы "Проект космологических сверхновых" в конце 1990-х гг. Верхний ряд: Грег Олдеринг, Сол Перлмуттер и Изабел Хук. Второй ряд сверху: Себастьян Фаббро и Алекс Ким. Третий ряд: Роб Кноп и Пилар Руис-Лапуэнте. Нижний ряд: Питер Нуджент, Ариэль Губар и Герсон Голдхабер. (Не показан Рейнальд Пейн (Reynald Pain), который делал снимок.)

для их спектроскопического отождествления (на 10-метровом телескопе им. Кека на Гавайях) и последующей фотометрии кривой блеска (на телескопе им. Исаака Ньютона на Канарских островах и на телескопе WIYN в Тусоне, Аризона).

Поэтому недели, во время которых проходили наши наблюдательные кампании, были поистине драматичными. Одни участники группы должны были лететь в Чили и затем возвращаться туда через три недели за "изображениями для открытий", в то время как другие в Беркли проводили практически в реальном времени анализ изображений с помощью недавно появившегося интернета. В это же время надо было летать на Гавайи, на Канары и в Тусон, при этом обмениваясь по электронной почте последней информацией о свойствах изучаемых объектов. К тому времени наша группа, называемая Проект космологических сверхновых (Supernova Cosmology Project, SCP), уже насчитывала второе или четвертое больше сотрудников, чем было вначале. Большая часть группы представлена на фото на рис. 22. Я хочу подчер-

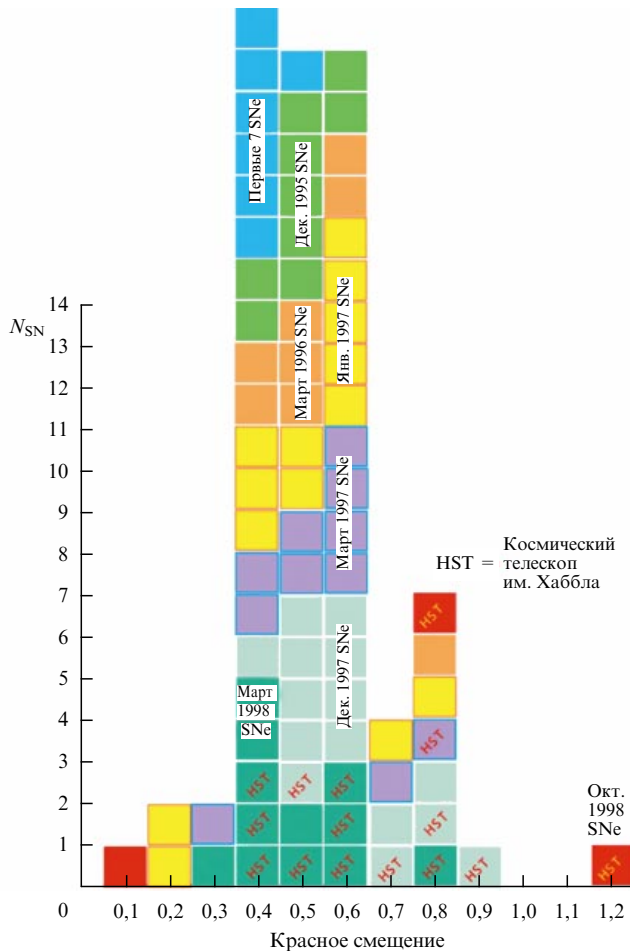


Рис. 23. (В цвете онлайн.) Каждые полгода (показаны разными цветами) между 1994 г. и 1998 г. метод "пакетного поиска и последующих наблюдений" давал дополнительные сверхновые типа Ia. Красное смещение (расстояние) возрастало, и мы стали использовать космический телескоп им. Хаббла для точных измерений далёких SN.

кнуть способность, креативность и увлечённость участников этой коллаборации, имевших большой опыт работы в научных коллективах.

Полугодие за полугодием мы стали наблюдать всё возрастающее число сверхновых типа Ia, постепенно открывая объекты на всё больших красных смещениях. На рисунке 23 разными цветами показаны интервалы красных смещений сверхновых, открытых и изученных каждые полгода: сначала полдюжины, потом дюжина, затем другая ... и к 1997 г. набралось достаточно сверхновых для проведения статистически значимых космологических тестов.

С увеличением статистики сверхновых на больших красных смещениях хаббловские диаграммы мало-помалу стали открывать нам историю расширения Вселенной. Кажется, что самые первые данные (красные точки на красном смещении $z = 0,4$ на рис. 24а) свидетельствуют о замедляющемся расширении без космологической постоянной, но дисперсия первых семи точек была достаточно большой. Это были самые первые далёкие сверхновые, которые мы изучили. После того как на их примере мы доказали работоспособность нашего пакетного метода открытия и последующих наблюдений сверхновых, мы могли заказывать время

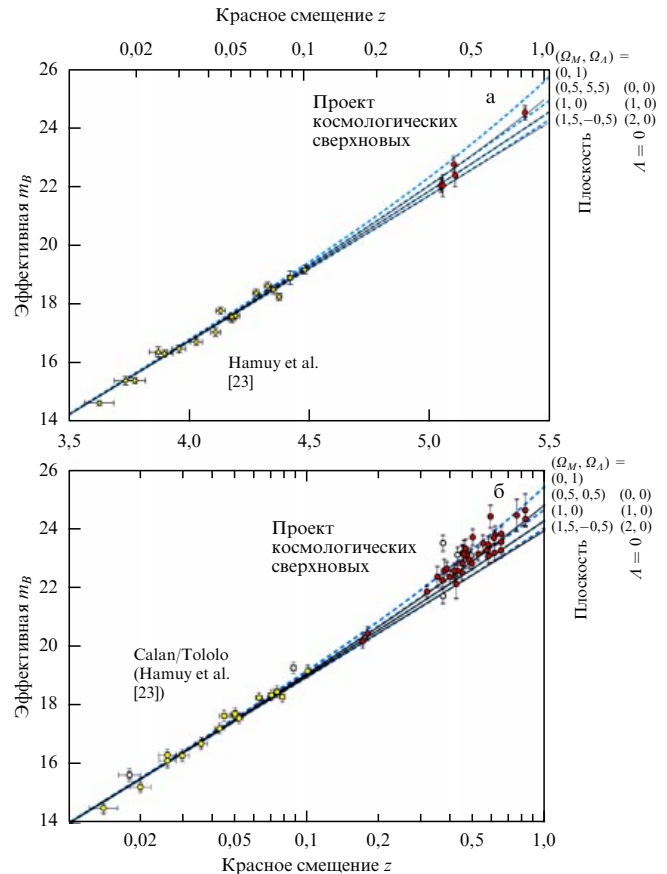


Рис. 24. (В цвете онлайн.) По мере накопления измерения новых далёких SN на хаббловских диаграммах стала вырисовываться история расширения Вселенной [37]. Кажется, что самые первые данные (красные точки вблизи красного смещения $z = 0,4$ на рис. а) свидетельствуют о замедляющейся Вселенной без космологической постоянной, однако измеренные 7 точек давали большой разброс. Даже одна хорошо промеренная (на телескопе им. Хаббла) сверхновая на вдвое большем красном смещении (красная точка на $z = 0,83$ на рис. а) стала свидетельствовать о совсем другой истории расширения. Однако только после измерения 42 сверхновых (красные точки на рис. б) стало окончательно ясно, что далёкие SN Ia свидетельствуют об ускоренном расширении Вселенной, в которой доминирует космологическая постоянная, а не обычное вещество.

для дальнейших наблюдений на крупных телескопах для аккуратного исследования новых объектов. Поэтому последовавшие за первыми сверхновые были измерены гораздо точнее.

В статье, опубликованной 1 января 1998 г. в журнале *Nature* [37], мы сообщали, что даже одна хорошо измеренная сверхновая (это были наблюдения с космического телескопа им. Хаббла) на удвоенном красном смещении (красная точка на $z = 0,83$ на рис. 24а) свидетельствовала об истории расширения, указывающей на модель Вселенной с космологической постоянной! Однако аргументы стали по-настоящему сильными после анализа 42 сверхновых (красные точки на рис. 24б). Теперь данные о сверхновых свидетельствуют о модели Вселенной, в которой доминирует космологическая постоянная, а не обычное вещество.

Перерисовав эти данные на графике, описывающем историю расширения Вселенной (рис. 25а), мы увидели, что ни одна из моделей с замедлением расширения не

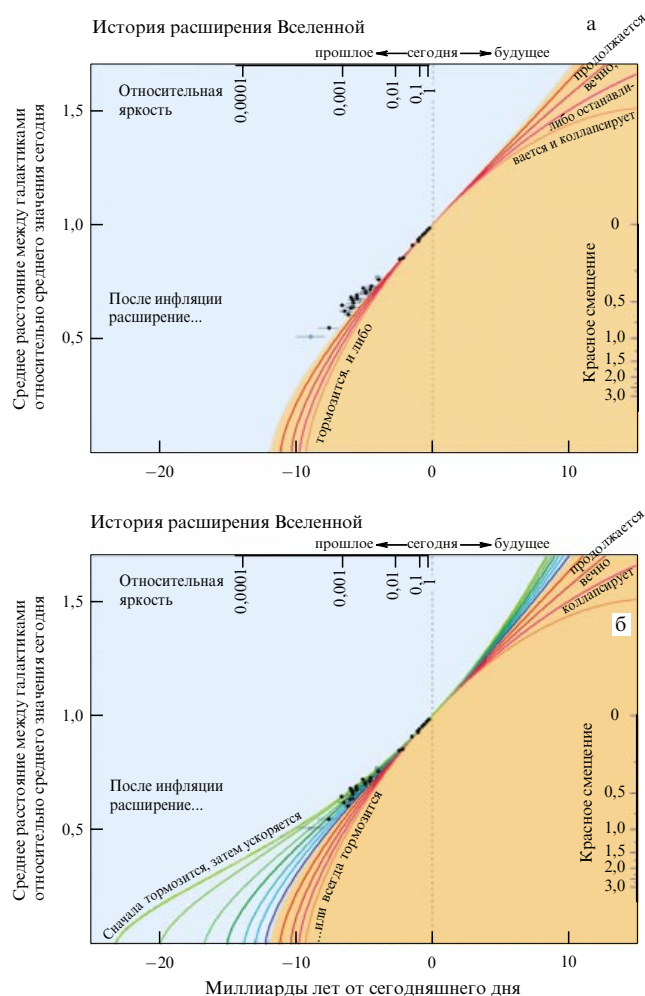


Рис. 25. (В цвете онлайн.) Наши измерения сверхновых не описывались никакой космологической моделью с постоянным замедлением расширения (рис. а). Чтобы описать наблюдения, потребовалось ввести модели с современным ускоренным расширением (голубая светлая область на рис. б). Наилучшее согласие достигается в модели, в которой расширение происходит с замедлением первые 7×10^9 лет, а затем с ускорением в последующие 7×10^9 лет. Это был самый удивительный результат, полученный из наблюдений космологических сверхновых. (На основе рисунка из работы [38].)

подходит. Стало ясно, что мы живём во Вселенной, которая не расширяется с замедлением, а имеет более интересную историю расширения, показанную на рис. 25б. Сначала Вселенная расширялась с замедлением, а в оставшуюся половину своего возраста стала расширяться с ускорением, которое, возможно, не прекратится и в будущем.

Очевидно, что во Вселенной доминирует некоторая доселе неизвестная субстанция, обобщённо называемая "тёмной энергией", и именно она заставляет Вселенную расширяться всё быстрее и быстрее. Она столь необычна, что не описывается современной физикой. Это один из самых удивительных выводов, который можно было сделать по результатам нашего проекта. Мне очень повезло, что я имел возможность работать в этом проекте — любой результат его был бы крайне интересным: например, могло бы обнаружиться, что Вселенная конечная или бесконечная, замкнутая или открытая. Любой из этих результатов имел бы огромное значение. Но вместо этого мы получили ещё более

"великий" научный результат, оказавшийся совершенно неожиданным. Об этом невозможно было даже мечтать!

Этот результат является прекрасным примером неожиданного открытия в науке. С одной стороны, его можно было получить только потому, что в нашей науке, физике, произошёл колоссальный прогресс в понимании Вселенной. Менее века назад представления о Вселенной ограничивались нашей галактикой — Млечным Путём. Огромные размеры Вселенной, факт её расширения, то, что в ней происходят взрывы звёзд — все эти и другие открытия были сделаны до нас и позволили нам обнаружить доселе неизвестную форму материи, которая на две трети заполняет Вселенную и отвечает за её ускоренное расширение.

Удивительно, как много мы уже знали, но, с другой стороны, удивительно, какая большая загадка открылась в результате и как много нам ещё предстоит узнать. Одним из величайших достоинств и привлекательной стороной науки во все времена были и остаются, как мне кажется, громадные знания, на основании которых делаются поразительные открытия.

Эти две стороны науки напоминают нам, что наука — это метод, а не застывший продукт. Мы не знаем, к чему она приведёт или какую чудесную власть над миром она даст нам в будущем. Заранее неизвестно, в какой степени фундаментальные научные открытия будут использоваться на практике, но история учит, что любой крупный шаг в понимании мира всегда приводил к решению большого числа проблем, в том числе прикладных. Мне кажется, что задача учёных, занятых решением фундаментальных проблем, и состоит в поиске нового понимания природы с надеждой на то, что оно в конечном счёте откроет много новых неожиданных возможностей для человечества.

10. Сцены десятилетия: импрессионистский набросок

Не должно складываться впечатление, что наука является сухой и чётко определённой деятельностью — поставить задачу, а потом решить её. На самом деле опыт проведения нашего исследования показал, что это непрерывный круговорот различной деятельности и людей. К сожалению, за 10 лет работы почти не осталось фотографий, подтверждающих это.

Однако несколько лет назад я попытался схематично восстановить самые запоминающиеся этапы десятилетней работы, предшествовавшей нашему открытию. (Я иллюстрирую их несколькими фотографиями тех лет, рис. 26–71.)

Всё началось с мозговой атаки в Беркли вместе с Карлом Пеннипакером (в 1987 г.), когда мы, тогда ещё в составе группы Рика Мюллера, впервые обсуждали планы разработки программного обеспечения и инструментов для поиска сверхновых на больших красных смещениях, к которой скоро присоединился и сам Рик. Затем работа продолжилась. В кафетерии высокогорной обсерватории в Кунабарабран (Австралия) Карл, аспирант Хейди Ньюберг (Heidi Newberg), бывший аспирант Шейн Бёрнс (Shane Burns) и я познакомились с коллегами, работавшими в Австрии, Уорриком Коучем (Warrick Couch) и Брайаном Бойлом (Braian Boyle). Они устанавливали и использовали наш чудный кристалличе-



Рис. 26. Карл Пеннипакер (слева) и Сол Перлмуттер.

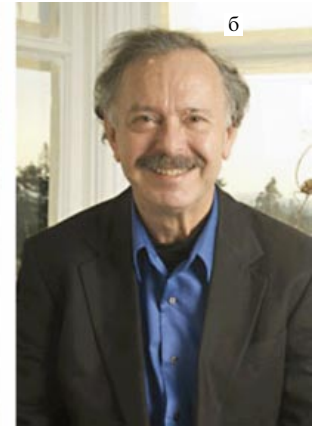
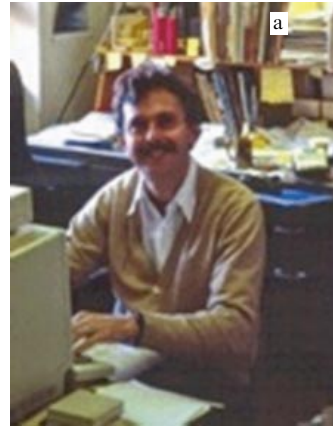


Рис. 27. Рик Мюллер тогда (а) и сейчас (б).

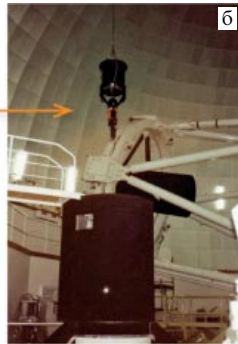
Рис. 28. Широкопольная $F/1$ ПЗС-камера устанавливается в фокус 4-метрового Англо-австралийского телескопа.

Рис. 29. Слева направо: Хейди Марвин Ньюберг, Уоррик Коуч, Карл Пеннипакер и Шейн Бёрнс в то время.



Рис. 30. Шейн Бёрнс сейчас.



Рис. 31. Брайан Бойл.



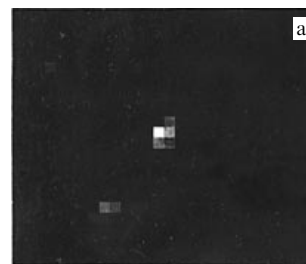
Рис. 32. Уоррик Коуч тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 33. Хейди Марвин Ньюберг.

ский шар с широкопольным корректором и камерой для 4-метрового телескопа ААТ — с помощью него нами были открыты первые далёкие (но не подтверждённые!) сверхновые.

Вернувшись в Беркли, я сделал фото Герсона Голдхабера (Gerson Goldhaber), который накладывал негативные и позитивные снимки областей неба с галактиками — таков был анализ изображений на заре компьютерной эпохи! Я должен здесь сделать паузу и сказать, что нам очень жаль, что сегодня Герсона больше нет с нами — он скончался год назад. Он был добрым сердцем — и острым глазом! — всей нашей группы, гостеприимным



Ноябрь 1989



Январь 1990

Рис. 34. Первая (неподтверждённая) далёкая сверхновая, открытая группой SCP на Англо-австралийском телескопе.



Рис. 35. Герсон Голдхабер.

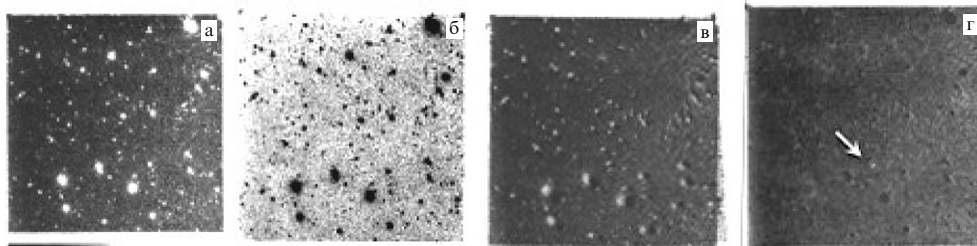


Рис. 36. Прозрачки с последовательными снимками далёких галактик и компьютерным вычитанием изображений для поиска возможных сверхновых.



Рис. 37. Англо-австралийский телескоп в Кунабарабран, Австралия (а) и телескоп им. Исаака Ньютона в Ла Пальме на Канарских островах (б).



Рис. 38. Ричард МакМагон тогда и сейчас.

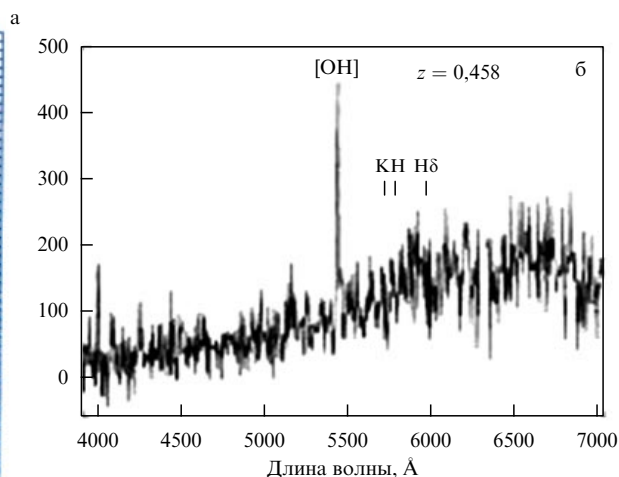
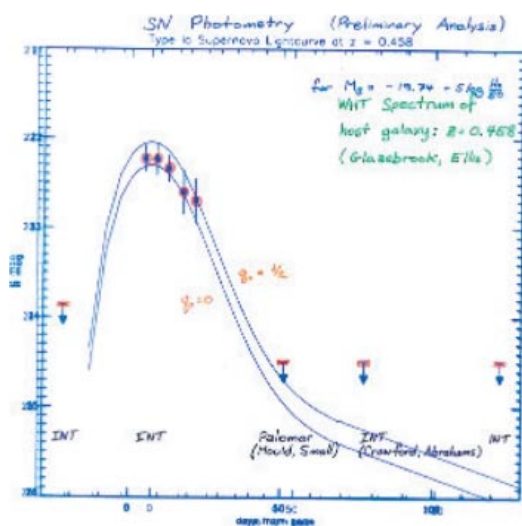


Рис. 39. (В цвете онлайн.) (а) Один из предварительных графиков с кривыми блеска первой официально подтверждённой сверхновой SN 1992bi, открытой группой SCP. Рисунок сделан на прозрачке, она наложена на другую прозрачку, на которой приведена ожидаемая кривая блеска близкой сверхновой типа Ia, отнесённой на наблюдаемое красное смещение. (б) Спектр хозяйской галактики SN 1992bi (первой официально подтверждённой сверхновой группы SCP), снятый на телескопе им. Уильяма Гершеля в обсерватории Ла Пальма.



Рис. 40. Ричард Эллис тогда (а) и сейчас (б).

хозяйном групповых вечеринок и он должен был бы праздновать сегодня вместе с нами. Нам его не хватает.

В Австралии было пасмурно и дождливо, но потом мы начали наблюдения в прекрасной солнечной Ла Пальме, где наш новый кембриджский коллега Ричард МакМагон (Richard McMahon) (работавший с Майком Ирвином (Mike Irwin)) изучал самые далёкие квазары. Были длинные ночи отладки нашего нового инструмента для Ла Пальмы, долгие телефонные звонки на телескоп им. Исаака Ньютона и пересылка данных для анализа в Беркли. А затем — открытие нашей первой "официальной" сверхновой на большом красном смещении, спектр которой был получен в Ла Пальме на телескопе им. Гершеля присоединившимся к нашей группе Ричардом Эллисом (Richard Ellis) — одним из пионеров датской группы.



Рис. 41. (а) Ариэль Губар (слева) и Карл Пеннипакер в 1998 г. (б) Ариэль Губар сегодня. (в) Алекс Ким. (г) Рейнальд Пейн.

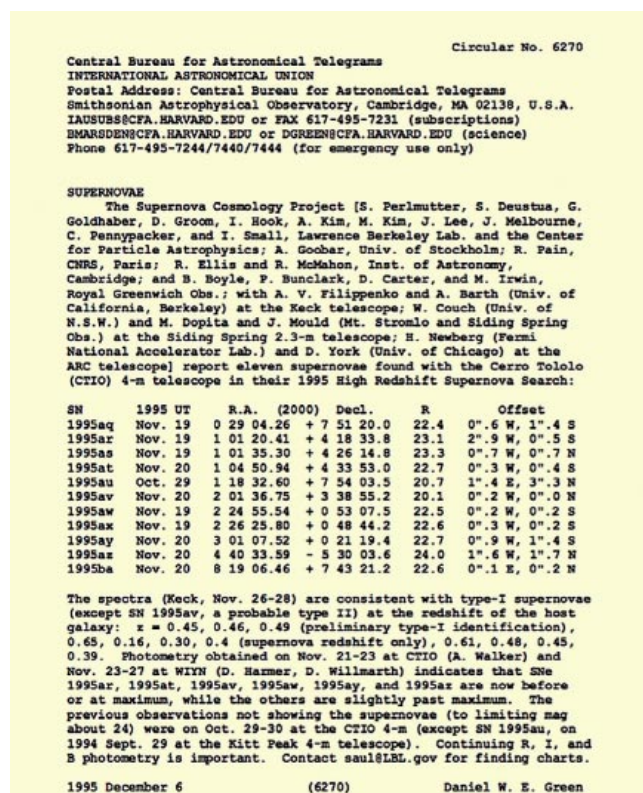


Рис. 42. Телеграмма МАС с "пакетом" открытых сверхновых.

К тому времени в Беркли всю работу делали европейцы. Ариэль Губар из Стокгольма вместе с аспирантом Алексом Кимом разработал новые методы анализа данных и активно обсуждал со мной космологические измерения сверхновых. С Рейнольдсом Пейном из Парижа мы обсуждали достоинства и недостатки "пакетного метода" обнаружения и последующих наблюдений сверхновых. Эта эпоха закончилась торжественной вечеринкой на холмах Беркли у Гертруды Голдхабера дома, где мы выпили по бутылке шампанского за каждую из полдюжины сверхновых, впервые открытых пакетным способом.

Ситуация несколько изменилась, когда мы стали наблюдать много сверхновых на крупных телескопах по всему миру. Обычно за них отвечал один из участников нашей группы, поддерживая связь с остальными по электронной почте, по телефону и факсу. Пилар Руис-Лапуэнте (Pilar Ruiz-Lapuente) и Ник Уолтон (Nic



Рис. 43. Пилар Руис-Лапуэнте тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 44. Крупные мировые телескопы, участвовавшие в проекте.

Walton) проводили наблюдения в Ла-Пальме, Крис Лидман (Chris Lidman) — на VLT в Чили, Брэд Шеффер (Brad Schaefer) — на Китт-Пике. Много исследователей отправились в обсерваторию Серро Тололо в Чили, в которой теперь описывалось большинство далёких сверхновых (я сфотографировал Дона Грума (Don Groom) и Сюзанну Деустуа (Susana Deustua) во время одного из таких наблюдений. После открытия новых объектов — кандидатов в сверхновые — другие участники спешили на вершину Мауна-Кеа для наблюдений на новом тогда телескопе им. Кека. У меня есть памятный



Рис. 45. Крис Лидман тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 46. Брэд Шеффер.



Рис. 47. Дон Грум.



Рис. 48. Сюзана Деу-стуа.



Рис. 49. Алекс Филиппенко.



Рис. 50. Том Мэтьюсон.



Рис. 51. Изобел Хук тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 52. Мэтью Ким.



Рис. 53. Себастьян Фаббро.



Рис. 54. Иван Смолл.



Рис. 55. Телескоп им. Хаббла.



Рис. 56. Энди Фрухтер.



Рис. 57. Нино Панагия.

видеокадр, снятый Алексом Филиппенко (Alex Filippenko), тогда ещё членом нашей группы, в котором его студент Том Мэтьюсон (Tom Matheson), наша новая коллега из Кембриджа д-р Изобел Хук (Isobel Hook) и я толпимся у экрана компьютера, на котором появляются всё новые и новые источники — спектроскопически подтверждённые сверхновые типа Ia. На других моих снимках в центре управления в Беркли работающие круглосуточно аспиранты: Мэтью Ким (Matthew Kim) и Себастьян Фаббро (Sebastien Fabbro) из Франции в комнате, заполненной студентами, постдоками и компьютерами, в которой наш новый студент Иван Смолл (Ivan Small) председательствует при представлении нового программного обеспечения для поиска сверхновых.

Теперь вообразите, как в безмолвном космосе телескоп им. Хаббла спокойно делает свою часть работы, а внизу на Земле Энди Фрухтер (Andy Fruchter) и Нино

Панагия (Nino Panagia) обрабатывают данные, полученные этим аппаратом.

Последний акт начинается видом уборки после корпоративной вечеринки, с невыпитыми ящиками бутылок шампанского — мы не тяжеловесы в этом деле, — на каждой из которых наклейка с номером нового объекта, который нужно анализировать. А вот свежоотдохнувшая команда на поле в Беркли: Роб Кноп (Rob Knop), который думает, стучит на клавиатуре компьютера и программирует быстрее, чем я говорю, Питер Нуджент (Peter Nugent), соединяющий теорию и данные наблюдений сверхновых, и Грег Олдеринг (Greg Aldering), управляющий всеми видами анализа данных и ... всей работой в целом.

Заключительная часть анализа проводится нашими молодыми студентами из Беркли, которые работают и по ночам, и по выходным (параллельные вычисления в чистом виде). Сначала это Джулия Ли (Julia Lee), потом — Патрисия Кастро (Patricia Castro), Нельсон Нунес (Nelson Nunes) и Роберт Квимби (Robert Quimby) — все они впоследствии продолжили карьеру в этой области астрофизики.



Рис. 58. Мэтью Ким (слева) и Роб Кноп на отдыхе.



Рис. 59. Роб Кноп.



Рис. 60. Питер Нуджент тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 61. Грег Олдеринг тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 62. Джулия Ли тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 63. Нельсон Нунес и Патрисия Кастро тогда (а), Нельсон Нунес сейчас (б), Патрисия Кастро сейчас (в).



Рис. 64. Роберт Квимби тогда (а) и сейчас (б).



Рис. 65. Группа Проекта космологических сверхновых в 2007 г.

Рис. 66. Группа Проекта поиска сверхновых на больших z в 2007 г.

И вот у нас всех перехватывает дыхание в благоговении от сделанного нами удивительного открытия, о котором я только что рассказал. И оно было сделано нашей научной группой!

Я думаю, из всего сказанного ясно, что популярный образ учёного-одиночки, сидящего в лаборатории, не

имеет ничего общего с нашим опытом: наука, по крайней мере для нас, — это социальная активность. Это конкретное исследование проводилось большим коллективом учёных. В наши две группы вошли многие (но далеко не все) мировые специалисты по сверхновым. И даже просто *перечисляя* здесь по именам часть этого коллектива, мне удалось представить только ключевых участников проекта, с которыми мне посчастливилось работать вместе.



Рис. 67. Хосе Маза.



Рис. 68. Марио Хамуй.

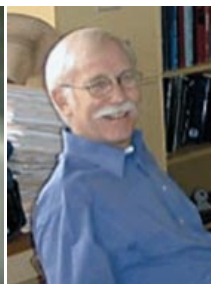
Рис. 69. Крег Уиллер
(Graig Wheeler).

Рис. 70. Густав Тамман.



Рис. 71. Дэвид Бранч.

11. Слово благодарности

Ничего бы этого не было без постоянной поддержки со стороны наших родных и друзей, наших учителей и наставников, а также со стороны всего штата сотрудников университетов, лабораторий и обсерваторий, а во многих случаях — по-настоящему смелых администраторов и грантодателей, рискнувших средствами на стадии, когда успех проекта был далеко не очевиден. Здесь сегодня присутствуют наши родственники и друзья, и мы все благодарны вам за помощь и долготерпение.

Но работа не закончена! Мы надеемся, что по мере более глубокого понимания того, что мы называем тёмной энергией, к нашим исследованиям будут присоединяться другие научные группы.

И, наконец, мы благодарны Нобелевскому комитету и фонду, которые сумели найти способ отметить важные достижения в этой области науки.

Спасибо.

Перевёл с английского К.А. Постнов

Список литературы

- Hubble E *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **15** 168 (1929)
- Baade W *Astrophys. J.* **88** 285 (1938)
- Kowal C T *Astron. J.* **73** 1021 (1968)
- Panagia N *Lecture Notes Phys.* **224** 14 (1985)
- Uomoto A, Kirshner R P *Astron. Astrophys.* **149** L7 (1985)
- Wheeler J C, Levreault R *Astrophys. J.* **294** L17 (1985)
- Muller R A et al. *Astrophys. J.* **384** L9 (1992)
- Nørgaard-Nielsen H U et al. *Nature* **339** 523 (1989)
- Hamuy M et al. *Astron. J.* **106** 2392 (1993)
- Perlmutter S et al. "Four Papers by the "Supernova Cosmology Project"", Lawrence Berkeley Laboratory Report No. LBL-38400 (Ed. S Perlmutter) (Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, 1995); also in *Thermonuclear Supernovae* (NATO ASI Series C, Vol. 486, Eds P Ruiz-Lapuente, R Canal, J Isern) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997)
- Lidman C et al. *Astron. Astrophys.* **430** 843 (2005)
- Leibundgut B *Astron. Astrophys.* **229** 1 (1990)
- Hamuy M et al. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **105** 787 (1993)
- Kim A, Goobar A, Perlmutter S *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **108** 190 (1996)
- Nugent P, Kim A, Perlmutter S *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **114** 803 (2002)
- Leibundgut B, PhD Thesis (Basel: Univ. of Basel, 1988)
- Tammann G A, Leibundgut B *Astron. Astrophys.* **236** 9 (1990)
- Branch D, Tammann G A *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **30** 359 (1992)
- Miller D L, Branch D *Astron. J.* **100** 530 (1990)
- Branch D, Miller D L *Astrophys. J.* **405** L5 (1993)
- Vaughan T E et al. *Astrophys. J.* **439** 558 (1995)
- Branch D, Fisher A, Nugent P *Astron. J.* **106** 2383 (1993)
- Hamuy M et al. *Astron. J.* **112** 2398 (1996)
- Phillips M *Astrophys. J.* **413** L105 (1993)
- Riess A G, Press W H, Kirshner R P *Astrophys. J.* **438** L17 (1995)
- Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **483** 565 (1997)
- Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
- Goldhaber G et al. "Four Papers by the "Supernova Cosmology Project"", Lawrence Berkeley Laboratory Report No. LBL-38400 (Ed. S Perlmutter) (Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, 1995); also in *Thermonuclear Supernovae* (NATO ASI Series C, Vol. 486, Eds P Ruiz-Lapuente, R Canal, J Isern) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997)
- Goldhaber G et al. *Astrophys. J.* **558** 359 (2001)
- Tripp R *Astron. Astrophys.* **331** 815 (1998)
- Tripp R, Branch D *Astrophys. J.* **525** 209 (1999)
- Aldering G *IAU Circ.* (7046) 1 (1998)
- Riess A G et al. *Astrophys. J.* **607** 665 (2004)
- Perlmutter S et al. *Astrophys. J. Lett.* **440** L41 (1995)
- Sullivan M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **340** 1057 (2003)
- Goobar A, Perlmutter S *Astrophys. J.* **450** 14 (1995)
- Perlmutter S et al. *Nature* **391** 51 (1998)
- Perlmutter S *Phys. Today* **56** (4) 53 (2003)