

Ускоренное расширение Вселенной по наблюдениям далёких сверхновых

Б.П. Шмидт

(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.0183.201310f.1078

Содержание

1. Введение (1078).
 2. Космологические модели XX века (1078).
 3. Сверхновые и моя карьера (1080).
3.1. Сверхновые. 3.2. Сверхновые от массивных звёзд. 3.3. Термоядерные взрывы.
 4. Аспирантура в Гарвардском университете (1081).
 5. Создание группы по изучению сверхновых на больших красных смещениях (1081).
 6. Группа по изучению сверхновых на больших красных смещениях: измерение параметра замедления расширения Вселенной (1083).
 7. Систематические эффекты (1086).
 8. Космология за пределами нормального вещества (1087).
 9. Открытие ускоренного расширения (1087).
 10. Заключительные замечания (1089).
- Список литературы (1089).

1. Введение

Это не просто рассказ о моей научной работе, но также и рассказ о развитии космологии на протяжении XX века, которое привело к открытию ускоренного расширения Вселенной. Он полон с точки зрения событий, которые касались лично меня, но я не пытался сделать его непредвзятым отчётом о достижениях и научных исследованиях, проводившихся в это время во всём мире.

2. Космологические модели XX века

В 1907 г. А. Эйнштейна, по его словам, "озарила мысль", что инерционное и гравитационное ускорения эквивалентны. Эйнштейну понадобилось 8 лет, чтобы в ноябре 1915 г. сформулировать эту мысль в форме общей теории относительности (ОТО) [1]. В течение последующего года де Ситтер изучал космологические приложения этой новой теории [2], которые предсказывали красное смещение в спектрах удалённых объектов во Вселенной в зависимости от расстояния до них. В 1917 г. Эйнштейн опубликовал свою модель Вселенной [3]. В рамках этой модели в уравнения ОТО им было введено дополнительное слагаемое — космологическая постоянная, которая должна была сбалансировать гравитационное притяжение отрицательным давлением, связанным с плотностью энергии вакуума. Эта поправка, полностью согласованная с его теорией, позволила ему построить статическую модель, которая соответствовала

представлениям о Вселенной того времени. Наконец, в 1922 г. Фридман опубликовал семейство моделей, описывающих изотропную и однородную Вселенную [4].

Наблюдательная космология по-настоящему началась в 1917 г., когда Весто Слайфер (Vesto Slipher) снял на плёнку спектры около 25 близких галактик с помощью призмного спектрографа [5]. (Я признателен родственникам Слайфера за выделение стипендии в честь его имени, которую я получал во время обучения в Аризонском университете.) Эти результаты озадачили его и всех астрономов того времени. Спектр почти каждой галактики был смещён в красную сторону и это означало, что практически все далёкие объекты во Вселенной удаляются от нас. Открытие Слайфера породило загадку для астрономов того времени: почему земному наблюдателю кажется, что остальная часть Вселенной как бы отталкивается от него?

Связь между теорией и наблюдениями в то время была чрезвычайно слабой, даже по меркам эпохи до интернета. В 1927 г. Жорж Леметр (Georges Lemaitre), бельгийский монах, который в своей диссертации на степень доктора философии в Массачусетском технологическом институте (MIT) независимо получил космологические решения Фридмана из ОТО, предсказал расширение Вселенной по закону, известному теперь как закон Хаббла. Он также заметил, что возраст Вселенной приблизительно равен обратному значению постоянной Хаббла и предположил, что данные Хаббла и Слайфера подтверждают этот вывод [6]. Его статья, опубликованная в бельгийском журнале, сначала не получила широкой известности, но не ускользнула от внимания Эйнштейна, который ознакомился с этой работой на научной конференции в 1927 г. и заметил Леметру: "Ваши вычисления корректны, но понимание физической сути в них полностью отсутствует" [7].

В 1928 г. Робертсон в Калифорнийском технологическом институте (Caltech) (неподалеку от офиса Эдвина Хаббла в обсерватории Карнеги) предсказал закон Хаббла и утверждал, что видит его при сравнении красных смещений галактик, измеренных Слайфером, и блеска этих галактик, измеренных Хабблом, однако это заключение не было должным образом доказано [8]. Наконец, в 1929 г. Хаббл представил работу, подтверждающую расширение Вселенной и содержащую чёткую зависимость красного смещения от расстояний до галактик; именно благодаря этой статье закон расширения Вселенной носит имя Хаббла [9]. Предполагая, что ярчайшие звёзды, видимые в галактиках, имеют одинаковую собственную светимость, Хаббл обнаружил, что чем быстрее удаляется объект (по измерениям Слайфера), тем слабее его видимый блеск. Иными словами, чем дальше галактика, тем с большей скоростью она удаляется от нас. Именно из этой зависимости Хаббл сделал вывод о расширении Вселенной.

Б.П. Шмидт (B.P. Schmidt). Australian National University, Weston Creek, Australia

На основе факта расширения Вселенной теория пришла к стандартной космологической модели, которая оставалась общепризнанной и в 1998 г., когда нами было открыто ускоренное расширение Вселенной. Эта стандартная модель базировалась на ОТО и двух основных предположениях. Первое предположение — о том, что Вселенная однородна и изотропна в больших масштабах, второе — о том, что она заполнена обычным веществом, т.е. веществом, плотность которого уменьшается обратно пропорционально занимаемому им объёму. В рамках этих предположений можно было предложить наблюдательные тесты теории в целом, а также вывести значения фундаментальных модельных констант — текущего значения темпа расширения (постоянная Хаббла) и средней плотности вещества во Вселенной. В этой модели можно было также напрямую связать плотность Вселенной с темпом космического замедления (чем больше вещества, тем быстрее замедление) и с геометрией пространства (выше некоторой критической плотности геометрия Вселенной оказывалась конечной (замкнутой), а ниже этой плотности — гиперболической (открытой)).

В математических терминах это можно записать так. Если Вселенная изотропна и однородна в больших масштабах, то геометрия пространства-времени описывается метрикой Робертсона–Уокера (Robertson–Walker):

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \right]. \quad (1)$$

В этом выражении, которое не зависит от конкретной теории гравитации, интервал s между двумя событиями зависит от координат r и θ , а также от времени t . Предполагается, что топология Вселенной простая и имеет постоянную отрицательную, нулевую или положительную кривизну, что соответствует значению параметра $k = -1, 0, 1$. Такие модели Вселенной называются открытыми, плоскими и замкнутыми соответственно. Метрика Робертсона–Уокера также подразумевает динамическую эволюцию Вселенной, которая задаётся эволюцией масштабного фактора $a(t)$. Этот фактор даёт радиус кривизны Вселенной или, проще говоря, отслеживает изменение относительного размера элемента пространства со временем. Уравнение для динамической эволюции Вселенной выводится из ОТО и впервые было получено Фридманом, поэтому носит его имя:

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2}. \quad (2)$$

Темп расширения Вселенной, H , называемый параметром Хаббла (или постоянной Хаббла, H_0 , в современную эпоху), изменяется в зависимости от состава Вселенной. На протяжении XX в. считалось, что Вселенная в основном заполнена единственной составляющей — веществом с плотностью ρ_i , которую обычно измеряют в долях критической плотности ρ_{crit} . Отношение средней плотности вещества к критической называют параметром плотности Ω_M и определяют согласно выражению

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{crit}}} \equiv \frac{\rho_i}{3H_0^2/8\pi G}. \quad (3)$$

Критическая плотность даёт значение плотности, при которой гравитационное взаимодействие вещества делает пространство Вселенной геометрически плоским ($k = 0$ в уравнении (1)). Ниже этой плотности Вселенная имеет открытую гиперболическую топологию ($k = -1$), а выше — замкнутую сферическую топологию ($k = +1$).

Как экспериментаторам, нам необходимы наблюдательные данные для проведения тестов и сравнения с теорией. Несколько таких тестов было разработано и детально описано в 1961 г. Алланом Сэндиджем [10] и их часто называют классическими космологическими тестами. Эти тесты включают измерение

яркости некоторого объекта в зависимости от его красного смещения. Красное смещение объекта z показывает, насколько спектр объекта был растянут из-за расширения Вселенной. Оно связано с масштабным фактором соотношением

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}} = \frac{a(z=0)}{a(z)}. \quad (4)$$

Красное смещение измеряется по принятой длине волны света λ_{obs} , который был испущен источником на длине волны λ_{emit} . Фотометрическое расстояние D_L определяется из закона обратных квадратов для источника со светимостью L , принимаемый поток от которого равен f :

$$D_L \equiv \sqrt{\frac{L}{4\pi f}}. \quad (5)$$

Традиционно это выражение используют в виде разложения в ряд Тейлора по красному смещению, которое получается из уравнений (1) и (2):

$$D_L \approx \frac{c}{H_0} \left[z + z^2 \frac{1 - q_0}{2} \right], \quad (6)$$

где c — скорость света, H_0 — современное значение темпа расширения Вселенной в единицах скорости, делённой на расстояние, а параметр замедления q_0 определяется как

$$q_0 \equiv -\frac{\ddot{a}_0}{\dot{a}_0^2} a_0 = \frac{\Omega_M}{2}. \quad (7)$$

Эквивалентность параметров Ω_M и q_0 следует из решения уравнений Фридмана в предположении, что Вселенная заполнена только веществом. Разложение в ряд Тейлора имеет точность в несколько процентов при $z < 0,5$ и было уточнено Маттигом [11], который получил точное выражение

$$D_L = \frac{c}{H_0 q_0^2} \left[q_0 z + (q_0 - 1) (\sqrt{1 + 2q_0 z} - 1) \right]. \quad (8)$$

Эти уравнения описывают один из классических космологических тестов — зависимость фотометрического расстояния от красного смещения. Одного измерения красного смещения и яркости источника с известной светимостью, находящегося на умеренном красном смещении (не слишком малом, чтобы можно было пренебречь пекулярными движениями, вызванными локальным гравитационным взаимодействием и дающими типичный вклад $z \sim 0,002$, и не слишком большим, чтобы можно было пренебречь вторым слагаемым в уравнении (6)) уже достаточно для оценки H_0 . Измеряя видимую яркость стандартной свечи (источника с фиксированной светимостью) как функцию красного смещения, по кривизне кривой можно определить параметр q_0 .

В принципе, определение H_0 из уравнения (6) не вызывает труда. Всё, что нужно, чтобы получить ответ — это аккуратно измерить расстояние и красное смещение источника в диапазоне $0,02 < z < 0,1$ и взять их отношение. Однако измерение абсолютных расстояний до источников представляет собой одну из наиболее трудных задач в астрономии — единственным геометрическим измерением является определение тригонометрических параллаксов источников (периодическое смещение положений близких звёзд из-за движения Земли вокруг Солнца), которое было возможно лишь для небольшого числа звёзд. Далее, сравнивая шаг за шагом яркость похожих источников, строят так называемую лестницу космических расстояний, используя которую можно определить расстояние до объекта с точностью до фактора 2. Эта неопределённость в расстояниях существовала вплоть до начала третьего тысячелетия.

Для определения q_0 потребовалось аккуратно измерить относительные расстояния (абсолютные значения не нужны, поскольку постоянную Хаббла в уравнениях (6) и (8) можно рассматривать как нормировку). Попытки, предпринятые в

1950-х гг. [12], были основаны на измерениях ярчайших источников — гигантских галактик в центрах скоплений — и дали неоднозначный ответ. В конце концов Тинсли [13] было показано, что яркость этих галактик значительно меняется со временем, поэтому они не подходят для космологических тестов. Прогресс в измерении q_0 требовал нахождения надёжной стандартной свечи, причём достаточно яркой, чтобы её можно было наблюдать с красных смещений $z > 0,3$, на которых кривизна зависимости фотометрического расстояния от красного смещения может быть аккуратно измерена.

3. Сверхновые и моя карьера

Моя научная карьера как астронома началась в 1985 г., когда я горящими глазами новичка приступил к изучению физики и астрономии в Аризонском университете. На первом курсе, слушая лекции по астрономии, я чувствовал себя подавленным рядом с моими старшими коллегами-астрономами, многие из которых, как мне казалось, обладали энциклопедическими знаниями обо всём — от белых карликов до квазаров. Я неплохо разбирался в физике, но ничего не знал об этих объектах, поэтому я решил отправиться в Стюардскую обсерваторию (Steward Observatory) для пополнения своих знаний и стал работать с Джоном МакГроу (John McGraw) над его пассажным ПЗС-телескопом (CCD Transit Instrument, CTI, рис. 1)¹.

Этот инструмент опередил своё время на 15 лет, и с его помощью были получены первые цифровые карты неба. В

работе этого телескопа использовались матрицы ПЗС (прибора с зарядовой связью). Телескоп оставался неподвижным, так что ночное небо проходило через его поле зрения, а суточное вращение отслеживалось на ПЗС-матрице с помощью электроники (так называемая техника дрейфового сканирования). Начиная с 2000 г. этот метод очень успешно применяется при проведении цифрового обзора неба имени Слоана (Sloan Digital Sky Survey). В 1985 г. ПЗС-матрицы ещё только начинали применяться в астрономических наблюдениях, поэтому данные, полученные телескопом CTI, были не очень надёжными. Однако эти наблюдения подтолкнули развитие программного обеспечения и вычислительных мощностей того времени для увеличения научной эффективности работы телескопа. Как и у всякого студента, моё продвижение было медленным, однако к концу 3-го курса я вёл уже настоящую работу в научной группе, пытаюсь найти способы обнаружения вспыхивающих сверхновых звёзд в данных этих наблюдений. К тому времени стало ясно, что так называемые сверхновые типа Ia могут быть хорошими стандартными свечами, поэтому имелась возможность с помощью телескопа CTI получить первые цифровые кривые блеска от выборки источников, находящихся на красных смещениях $z > 0,01$, и провести с их помощью космологические тесты. Задача была не из лёгких из-за огромного массива данных, и по причине ограниченности вычислительных мощностей мы могли только изучать каталоги источников. Сверхновые, однако, обычно вспыхивают в галактиках, поэтому при составлении каталогов бывает трудно различить новые объекты на фоне сложной структуры изображения галактики. К моменту написания диплома мне удалось обнаружить возможного кандидата в сверхновую. К сожалению, он был в данных, полученных год назад, и поэтому не мог быть подтверждён новыми наблюдениями.



Рис. 1. Телескоп CTI в обсерватории Китт Пик (Аризона).

3.1. Сверхновые

Сверхновые (SN), которые являются очень яркими вспышками, сопровождающимися взрывы звёзд, отличаются крайним разнообразием и имеют сложную классификацию. Исторически по виду спектра их разделили на два типа. В спектре сверхновых типа I нет линий водорода, а типа II — есть. Со временем эти группы разделили на подклассы. К типу I относят богатые кремнием SN типа Ia, богатые гелием SN типа Ib, и те, в спектрах которых нет ни гелия, ни кремния (типа Ic). Сверхновые типа II разделяют на II-P, в кривых блеска которых наблюдается протяжённое ($a \approx 100$ дней) "плато", на II-L, кривые блеска которых линейно убывают со временем, и на II-n, в спектрах которых наблюдаются узкие линии [14].

3.2. Сверхновые от массивных звёзд

Когда большое количество кремния в ядре массивной звезды превращается в железо, происходит гравитационный коллапс ядра. Поскольку давление больше не создаётся теплом, выделяемым при термоядерных реакциях, ядро сжимается в нейтронную звезду, а выделяемая при этом энергия в форме нейтрино порождает ударную волну во внешней оболочке звезды. Массивная звезда, в оболочке которой осталось много водорода, взрывается как SN II-P. Другие типы SN возникают на разных стадиях потери массы звездой. Так, SN Ib появляются при коллапсах ядер массивных звёзд, потерявших водородную оболочку, а SN Ic образуются из массивных звёзд, потерявших еще и гелиевую оболочку.

3.3. Термоядерные взрывы

Такие взрывы происходят при быстром термоядерном горении (детонации) белого карлика. При этом вся звезда превращается в основном в ^{56}Ni и в промежуточные элементы, такие как сера и кремний. Долго считалось, что это происходит, когда белый карлик увеличивает свою массу примерно до $1,38M_{\odot}$ за счёт аккреции вещества со второго компонента в двойной системе. В 1931 г. Чандрасекар показал, что при такой массе собственная

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

гравитация белого карлика превосходит градиент давления, созданного вырожденным электронным газом [15]. Как только белый карлик приближается к этому критическому переходу, высокое давление и плотность в его ядре приводят к началу горения углерода вблизи центра, что в конечном счёте ведёт к распространению фронта термоядерного горения на всю звезду. Сейчас подозревают, что такое горение можно инициировать разными способами. Например, можно получить взрыв до достижения массой предела Чандрасекара, инициированный детонацией поверхностного гелиевого слоя, из-за которой центральные части белого карлика сжимаются до точки начала термоядерного горения, или взрыв при массе выше предела Чандрасекара при слиянии пары белых карликов в тесной двойной системе из-за гравитационного излучения.

4. Аспирантура в Гарвардском университете

В конце 1988 г. я подал заявки в ряд университетов в надежде получить стипендию для работы над моей кандидатской диссертацией. Я был настроен не особенно оптимистично, так как был наслышан от других об огромном конкурсе в аспирантуру. К моему удивлению, в мой 22-й день рождения (24 февраля 1989 г.) мне позвонил Боб Киршнер (Bob Kirshner) из Гарвардского университета и сообщил, что меня приняли в аспирантуру по Гарвардской астрономической программе. Это был лучший подарок ко дню рождения за всю мою жизнь! В ближайшие часы и дни после этого звонка прозвучало ещё несколько предложений, и мне предстоял трудный выбор места учёбы. Остаться ли на западном побережье США, где я чувствовал себя вполне комфортно, или переехать на восток, который мне казался во многом новой страной. После посещения мной нескольких университетских кампусов Гарвард оказался в начале моего списка, и окончательное решение было принято, когда Боб Киршнер посетил Тусон (Tucson) для прочтения первой мемориальной лекции имени Ааронсона и спросил меня, хочу ли я работать над кандидатской диссертацией под его руководством.

Приехав в Гарвардский университет для работы с Бобом Киршнером, я решил сосредоточиться на изучении сверхновых, а не на методике их открытия. Идея измерить постоянную Хаббла с их помощью мне понравилась, и мы решили развить метод калибровки светимости сверхновых типа II, предложенный в кандидатской диссертации Боба Киршнера [16]. SN 1987A была ближайшей к Земле сверхновой, наблюдавшейся за последние почти 400 лет, и вызвала всплеск активности в этой области. Аспирант Боба Рон Истман (Ron Eastman) написал сложную программу, моделирующую спектр излучения от этой сверхновой. В моей диссертации нужно было применить теорию Рона к нескольким далёким сверхновым с тем, чтобы можно было надёжно определить постоянную Хаббла. Сверхновые II-P хорошо подходили для этой цели, так как имели простые водородные атмосферы, спектр выходящего излучения из которых был близок к чернотельному. К тому же их расширение не тормозилось гравитацией, что позволяло нам определять радиус оболочки по измерениям скорости в разные моменты времени по эффекту Доплера, используя линии поглощения в их спектрах. Таким образом, совместный расчёт потока выходящего излучения и измерение скорости расширения позволяли нам определить расстояние до сверхновой из чисто физических соображений. Мы назвали этот метод "методом расширяющейся фотосферы" (Expanding Photosphere Method, EPM).

Кроме наблюдений этот метод требовал существенного привлечения модельных расчётов атмосфер сверхновых для вычисления поправок к чернотельному спектру. В идеале такие расчёты следовало бы проводить индивидуально для каждой конкретной SN, но расчёты занимали недели, поэтому мы использовали найденное нами приближение, в котором поправки к чернотельному спектру зависели только от температуры фотосферы сверхновой. В своей диссертации я ис-

пользовал этот метод для измерения расстояний до 14 SN II на красных смещениях $0,005 < z < 0,05$ и определил 95%-ный доверительный интервал для значения постоянной Хаббла: $61 < H_0 < 85 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ [17]. Этот результат был совершенно независимым от шкалы космических расстояний, основанной на последовательном измерении расстояний от нашей Солнечной системы до ближайших галактик, но находился в почти полном согласии с измерениями галактик, расстояния до которых были определены по переменным звёздам — цефеидам — как часть Ключевой программы космического телескопа им. Хаббла (Hubble Key Project). Сегодня этот интервал составляет $67 < H_0 < 75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Работа по использованию SN типа II для определения расстояний продолжается и, хотя ряд предположений в моей диссертации были не бесспорными, основное содержание метода не изменилось.

После моей кандидатской диссертации следующим очевидным шагом была бы попытка измерить параметр замедления q_0 по выборке этих сверхновых, но SN II и метод расширяющихся фотосфер обладают тремя существенными недостатками для измерения глобальных свойств Вселенной. Во-первых, SN II трудно наблюдать имеющимися инструментами при $z > 0,3$ — они слишком слабые. Во-вторых, они требуют значительного числа тщательных одновременных фотометрических и спектральных измерений в разные эпохи, что делает этот метод необыкновенно затратным и практически невыполнимым для определения параметра q_0 . Наконец, не слишком плохая точность определения индивидуальных расстояний методом EPM — приблизительно 15% — требует наблюдения большого числа объектов для достижения космологически интересной точности в определении параметра q_0 . Принципиальное преимущество метода EPM — абсолютная калибровка источников — и важное для измерения H_0 , оказывается несущественным для измерения q_0 . К счастью, во время работы над диссертацией я узнал о быстром растущем числе работ по измерению расстояний до сверхновых типа Ia. А главное — я познакомился и начал работать с мировыми экспертами по этим объектам, и эти неформальные отношения в конечном итоге привели к созданию группы по поиску сверхновых на больших красных смещениях (High-Z SN Search Team).

5. Создание группы по изучению сверхновых на больших красных смещениях²

Я приехал в Гарвард в 1989 г. вместе с новым пост-доком Боба, швейцарцем по национальности, Бруно Лейбундгудом (Bruno Leibundgut). Вместо изучения SN 1987A и связанных с ней SN типа II, чем занималось большинство исследователей в то время, Бруно сосредоточился на изучении вопроса, насколько стандартными могут быть SN Ia. Из далеко не идеальных данных наблюдений следовало, что все сверхновые типа Ia почти одинаковы, и поэтому потенциально их можно использовать для космологических тестов.

При работе над своей диссертацией Бруно провёл много ночей на телескопах в Чили, снимая фотопластинки для открытия сверхновых по программе своего научного руководителя Густава Таммана (Gustav Tammann) и его соавтора Аллана Сэндиджа (Allan Sandage). Хотя в этом проекте были открыты многие сверхновые, данных было недостаточно для проверки гипотезы о SN Ia как стандартных свечах. Бруно использовал все данные наблюдений, полученные им за пять лет, а также данные других наблюдателей для создания средней наблюдаемой кривой блеска SN Ia, которую можно было использовать как стандарт для проверки однородности семейства SN Ia. Его результат был чрезвычайно обнадеживающим — оказалось, что все кривые блеска SN Ia имеют стандартный вид [18]. Находясь в Гарварде, Бруно мог использовать гарвардские

² The High-Z Team. (Примеч. ред.)



Рис. 2. Боб Киршнер изучает результаты моей диссертации (Гарвард, 1993 г.).

инструменты — новый 1,2-метровый телескоп с ПЗС-матрицей для мониторинга кривых блеска близких SN Ia сразу после их открытия и большой многозеркальный телескоп (Multiple Mirror Telescope, MMT) для измерения их спектров. Наши первые совместные наблюдения, состоявшиеся вскоре после появления в Гарварде, привели, как мне кажется, к единственному недоразумению в наших отношениях. Мы разошлись во мнениях относительно того, какие именно объекты надо наблюдать. Тот факт, что Бруно был уже постдоком, а я — аспирантом, не имел значения в наших спорах. Однако в течение нескольких месяцев мы научились уважать мнения друг друга и с тех пор, если Бруно не соглашается с тем, что я говорю или делаю, я сначала слушаю его и только потом задаю вопросы.

Первый научный прорыв, сделанный Бруно в Гарвардском университете, был связан со сверхновой 1990N, открытой летом 1990 г., как раз в то время, когда я и Бруно отравились в Европу для участия в летней школе по сверхновым в деревушке Лез Уш (Les Houches) во французских Альпах. Эта сверхновая была открыта спустя очень короткое время после взрыва, и в её спектре обнаруживались удивительные устойчивые особенности, которые отличали её от других SN Ia. Однако кривая блеска SN 1990N прекрасно описывалась средней кривой, найденной Бруно [19].

В Лез Уш я осознал, насколько мне повезло быть астрономом. В элегантной деревушке вблизи Монблана я на 5 недель очутился в окружении группы студентов со всего мира, которые слушали лекции великих специалистов. Мне кажется, это были самые замечательные 5 недель в моей жизни. Там я встретил молодого чилийца, Марио Хамуй (Mario Hamuy), который работал в Межамериканской обсерватории Серро-Тололо (Cerro Tololo Inter-American Observatory, СТЮ) ассистентом штатного астронома СТЮ Ника Санцеффа (Nick Suntzeff). Я знал Марио по его фотометрическим наблюдениям SN 1987A в Большом Магеллановом облаке, которые он провёл вместе с Ником и которые я использовал в своей диссертации для получения оценки расстояния до этой сверхновой.

Марио рассказал нам о новом проекте, обзоре Калан/Тололо (Calan/Tololo survey), в котором должен был использоваться телескоп Куртиса Шмидта (Curtis Schmidt telescope) в СТЮ для открытия ещё более далёких сверхновых, чем те, которые мы все изучали. По сверхновым на $0,02 < z < 0,1$ из обзора Калан/Тололо можно было проверить гипотезу стандартной свечи, используя красные смещения как точный индикатор относительных расстояний. Как раз в том году участники этой группы — Марио Хамуй, Ник Санцефф и Марк Филлипс (Mark Phillips) из СТЮ и Хосе Маза (Jose Maza) из Университета Чили — начали эту программу. В дополнение к наблюдениям SN 1987A Ника и Марио, в 1980-х гг. Хосе Маза проводил успешные поиски сверхновых в обсерватории Калан, а Марк наблюдал SN 1986G в близкой галактике Центавр А. SN 1986G

была одной из первых сверхновых, наблюдавшихся с помощью ПЗС-приёмника, и имела кривую блеска, которую в конце концов признали необычной по сравнению со средней кривой Лейбундгута.

Отчасти из-за участия в работе школы в Лез Уш, а главным образом из-за последующей работы по изучению SN 1987A, которую Боб Киршнер проводил с Марком Филлипсом и Ником Санцеффом, моя 5-недельная командировка в СТЮ была запланирована на конец 1991 г. Там я мог использовать данные обзора SN II Калан/Тололо для моей диссертации и изучить технику, применявшуюся в СТЮ для аккуратного измерения кривых блеска SN Ia с использованием ПЗС-приёмников, чтобы потом применить её к моим SN II. Для смягчения культурного шока от первого посещения СТЮ мой визит был объединён с поездкой туда ещё одного аспиранта Боба Киршнера, Криса Смита (Chris Smith), который начинал свою первую постдокскую работу в этой обсерватории.

После долгого перелёта из Майами в Сантьяго мне ещё предстояла утомительная 6-часовая поездка на автобусе в Ла Серену (La Serena). На автобусной станции я встретил Пита Чаллиса (Pete Challis) из Научного института космического телескопа, который также направлялся в СТЮ для проведения длительных наблюдений. За 6 часов пути в Ла Серену мы с Питом говорили о многом, и вскоре выяснилось, что в Мичигане Пит был студентом у моего научного руководителя Боба Киршнера, а в настоящее время ищет новое место работы. Я сказал Питу, что Боб как раз подыскивает кого-нибудь, кто смог бы помочь ему в наблюдениях на космическом телескопе им. Хаббла. Таким образом, научные пути Пита и Боба вновь сошлись и они продолжают совместную работу по сей день.

В Ла Серене меня встретили Марио Хамуй и Марк Филлипс. С обратным рейсом автобуса в Сантьяго они передали деревянный ящик с фотопластинками, снятыми на телескопе Куртиса Шмидта. Пока я отсыпался после долгой дороги, фотопластинки уехали обратно на юг в Университет Чили, где на следующий день Хосе Маза и его сотрудники стали искать на них сверхновые. Таким способом в обзоре Калан/Тололо в 1990–1993 гг. было открыто более 50 новых объектов. Для проведения этого обзора регулярно заранее выделялось время на 4-метровом и 1,5-метровом телескопах СТЮ для получения спектров вновь открытых объектов. Фотометрические наблюдения не требовали больших экспозиций, поэтому наблюдения проводились по мере необходимости за счёт регулярных наблюдательных программ на телескопах СТЮ. Впрочем, наблюдатели охотно делились временем и разделяли наш энтузиазм и желание проследить за эволюцией новых астрономических объектов всего за несколько ночей!

Через несколько дней после приезда я поинтересовался у Марио, как идёт его работа по изучению SN Ia, и он сказал, что очень расстроен. Он показал мне пару первых сверхновых. Спектр одной из них, SN 1990af, выглядел вполне обычно, однако кривая блеска возрастала и убывала заметно быстрее, чем в среднем. Ещё более важным было то, что эта сверхновая была значительно слабее других объектов выборки, хотя и имела то же самое красное смещение. Марио казалось, что программа Калан/Тололо по использованию сверхновых для определения параметров H_0 и q_0 наткнулась на неожиданное препятствие — источники, с помощью которых планировались измерения расстояний, не оправдали своей репутации и не были стандартными свечами!

1991 год оказался переломным в исследованиях сверхновых типа Ia. В начале года в близкой галактике вспыхнула SN 1991T. В статье, написанной Марком Филлипсом и др. [20], а также в работе Алекса Филипченко и др. [21] было показано, что эта сверхновая весьма необычна. В её ранних спектрах были видны дополнительные особенности, но отсутствовала наиболее примечательная для этого класса сверхновых линия кремния на длине волны 6130 Å. Кроме того, кривая блеска возрастала и убывала гораздо медленнее, чем в среднем, а сам источник

казался слишком ярким для расстояния до хозяйской галактики. Ввиду неопределённости в поглощении пылью на луче зрения и расстоянии до хозяйской галактики, мы не могли быть абсолютно уверенными в том, что эта сверхновая действительно значительно ярче остальных. В то же время в работе Джейсона Спиромилио (Jason Spyromilio) из Англо-австралийской обсерватории было показано, что SN 1991T произвела гораздо больше железа, чем типичная SN Ia [22]. Позднее в близкой эллиптической галактике была открыта другая сверхновая SN 1991bg. В работах [23, 24] было показано, что она имела необычный спектр и кривую блеска, убывающую быстрее, чем в среднем. В этом случае блеск источника был заметно слабее, чем в среднем, поскольку отсутствовало поглощение пылью.

К 1993 г., основываясь на выборке близких сверхновых и анализе данных обзора Калан/Тололо, Марк Филлипс написал свою знаменитую работу, в которой сопоставил темп спадания блеска сверхновых со светимостью и обнаружил, что чем быстрее изменяется блеск, тем систематически слабее оказываются источники по сравнению с теми, у которых блеск эволюционирует медленнее [25]³. Я был настроен немного скептически — несмотря на то что SN 1991bg была явно необычной, выборка источников в работе Марка 1993 г. была ограничена близкими галактиками, расстояния до которых были известны с большими ошибками. Мне казалось, что если из анализа исключить SN 1991bg, то обнаруженная корреляция исчезнет. Однако эта работа заставила задуматься над такой проблемой. Боб Киршнер поручил своему новому аспиранту, Адаму Риссу (Adam Riess), выбиравшему тему для своей диссертации, разработать методику моделирования кривых блеска SN Ia и оценки расстояний до них, используя опыт Билла Пресса (Bill Press) в статистическом анализе данных (он сидел этажом ниже в Астрофизическом центре).

В это время я заканчивал работу над диссертацией по SN II-P, но подолгу беседовал с Адамом об этом проекте. Вырисовывающаяся картина SN Ia была настолько интересной, что, несмотря на необходимость писать диссертацию, я не переставал думать о том, как измерить расстояния до SN Ia. Я защитил диссертацию в августе 1993 г. и остался на постдок-ской позиции в Астрофизическом центре. Стипендия Гарвард-Смитсоновского Астрофизического центра позволяла мне заниматься чем угодно, но что более важно — я имел возможность продолжать сотрудничество с группой Боба Киршнера.

В начале 1994 г. к нам приехал Марио Хамуй из группы Калан/Тололо. В эту группу вошли Боб Шоммер (Bob Schommer), астроном из СТЮ, имеющий опыт измерения постоянной Хаббла с использованием техники Талли–Фишера, и Крис Смит (ещё один студент Киршнера), чей богатый опыт астронома-наблюдателя и аналитические способности использовались при анализе кривых блеска сверхновых. У Марио имелись первые 13 кривых блеска сверхновых с известными расстояниями из каталога Калан/Тололо, из которых, на мой взгляд, следовало удивительное открытие. При применении соотношения Марка Филлипса к этой независимой выборке источников разброс точек вокруг закона Хаббла, построенного по этим сверхновым, значительно уменьшался, а точность индивидуального измерения расстояния до SN Ia становилась больше 7%. Это было гораздо лучше, чем можно было получить другими способами. Группа Калан/Тололо разрешила Адаму испробовать его новый статистический метод применительно к новым данным о сверхновых — они находились достаточно далеко, так что их относительные расстояния могли быть аккуратно измерены по красным смещениям, и таким образом устранялась одна из принципиальных проблем в прежних работах по расстояниям до SN Ia.

Через месяц, во время наблюдений на Многозеркальном телескопе (ММТ) Бобу Киршнеру, Адаму Риссу и Питу Чаллису позвонил Сол Перлмуттер (Saul Perlmutter) из Проекта космологических сверхновых (Supernova Cosmology Project, SCP) и попросил пронаблюдать открытую ими возможную очень далёкую сверхновую на большом красном смещении. Группа SCP пыталась обнаружить далёкие SN Ia уже 5 лет. На следующее утро, взглянув на спектр, полученный на ММТ, я пришёл в крайнее волнение — Пит уже обработал данные и было ясно, что перед нами спектр сверхновой типа Ia на красном смещении $z = 0,42!$ В течение дня я подтвердил это, независимо проанализировав спектр в своём уютном офисе в Астрофизическом центре. В последующие недели, пока шли переговоры с группой Сола о публикации спектра в Циркуляре международного астрономического союза, мы поняли, что эта сверхновая — не единственная, и за последние месяцы SCP уже открыла несколько таких объектов.

Эти два достижения — развитие методов точного измерения расстояний до SN Ia и способность открывать эти объекты в далёкой Вселенной — были необходимыми частями для проведения успешной кампании по измерению параметра торможения. Группа Проекта космологических сверхновых работала над этой задачей начиная с 1988 г., но было ясно, что их подход значительно отличался от нашего, особенно в плане точного измерения расстояний до сверхновых.

6. Группа по изучению сверхновых на больших красных смещениях: измерение параметра замедления расширения Вселенной

В середине 1994 г. я приехал в СТЮ для проведения наблюдений скоплений галактик, из которых в конечном счёте ничего интересного не вышло. Пока я находился в СТЮ после наблюдений, вместе с Ником Санцеффом мы набросали план использования 4-метрового телескопа СТЮ по проведению собственной кампании по измерению q_0 , учитывая, что все необходимые для этого методы и средства нам доступны. Задача измерения q_0 изначально ставилась как одна из целей обзора Калан/Тололо, но возможность сделать это предоставлялась несколькими годами ранее, чем ожидалось.

Сверхновые типа Ia являются редкими событиями, в среднем они вспыхивают в галактике типа Млечного Пути несколько раз в тысячу лет. Поскольку нарастание блеска до максимума у такой сверхновой происходит в среднем за 20 дней, наблюдения одной и той же области на небе с интервалом в один месяц (что соответствует 20 дням в собственной системе отсчёта на красном смещении $z = 0,5$) позволяют увидеть новые источники



Рис. 3. Брайан Шмидт, Пит Чаллис и Ник Санцефф за обсуждением проекта поиска SN на больших красных смещениях в обсерватории Серро-Тололо.

³ Эта особенность была независимо обнаружена в работах Ю.П. Псковского (ГАИШ МГУ). Филлипс ссылается на них в своей статье. (Примеч. перев.)

в среднем вблизи их максимума блеска, что как раз и требуется для точного измерения расстояния до них. На 4-метровом телескопе СТЮ была установлена совершенная для того времени ПЗС-матрица размером 2048×2048 пикселей, с помощью которой можно было наблюдать самое широкое поле зрения для любого работающего тогда 4-метрового телескопа. Погода в СТЮ во время чилийского лета была безукоризненной и не могла помешать астрономическим наблюдениям. Это был существенный момент, так как в эксперименте для сравнения требовалось получить снимок той же области спустя месяц и наперёд распланировать время телескопа для последующих наблюдений кандидатов. Плохая погода в любой момент могла оказаться фатальной для всего эксперимента, поскольку кандидаты в сверхновые могли быть пропущены и значительное время телескопов тратилось бы впустую. Насколько мне известно, с этим много раз сталкивался проект SCP.

Вскоре к нам с Ником присоединились Марк Филлипс, Марио Хамуй, Крис Смит и Боб Шоммер (СТЮ), а также Хосе Маза (Университет Чили) из Проекта поиска сверхновых в обзоре Калан/Тололо. Мы также пригласили Бруно Лейбундуга и Джейсона Спиромилло, которые работали в Европейской южной обсерватории (European Southern Observatory, ESO), и Боба Кишнера, Пита Чаллиса, Питера Гарнавича (Peter Garnavich) и Адама Рисса из Гарварда. Такая команда была во всеоружии как для открытия сверхновых типа Ia, так и для их дальнейшего анализа. Проект был подготовлен, когда у меня родился первый ребенок Киран (Kieran), а Ник Санцефф и Боб Кишнер отшлифовали заявку нашей группы и отправили её 29 сентября 1994 г. (рис. 4).

Мне удалось получить постдоксовскую позицию в Австралии в обсерватории Маунт-Стромло (Mt Stromlo Observatory), так что в течение последних месяцев пребывания в Гарвард-Смитсоновском Астрофизическом центре в конце 1994 г. я стал писать программу обработки данных по открытию сверхновых. Сверхновые не всегда легко отождествить как новые точечные объекты в галактиках — большую часть времени они неразличимы на фоне галактик, так что для их идентификации требуется специальная техника. Из разговоров с коллегами из SCP я знал, что ими была разработана специальная процедура обработки изображений, с помощью которой они успешно открывали удалённые сверхновые.

В диссертации я разработал технику автоматического совмещения изображений, но земная атмосфера размывала каждый снимок по-разному, из-за чего так называемая функция размытия точечного источника (point spread function, PSF) каждый раз была своя. В СТЮ я встретил Дрю Филлипса (Drew Phillips), который разработал технику для свёртки изоб-

ражения с некоторым ядром для сравнения двух PSF от одного источника, что позволило проводить чёткий анализ изображений. Я положил этот метод в основу нашей процедуры обработки данных и разработал программы автоматического анализа больших массивов данных, которые были в нашем распоряжении к началу 1995 г. С их помощью можно было обрабатывать гигабайты данных изображений, получаемых в течение одной ночи, сравнивать их с предыдущими эпохами, а затем корректировать PSF таким образом, чтобы два изображения в разные эпохи были как можно более идентичными. Для поиска новых источников обработанные таким образом два изображения вычитались друг из друга, что позволяло в основном убирать постоянные источники.

В последние месяцы пребывания в Гарвард-Смитсоновском Астрофизическом центре туда приехал новый постдок Боба Кишнера, Питер Гарнавич. В то время он в основном занимался изучением SN 1987a и другой близкой сверхновой SN 1993J, но с ним, как с новым коллегой, я стал обсуждать нашу программу поиска сверхновых на больших красных смещениях. Мы быстро подружились и, несмотря на короткий срок совместного пребывания в Гарварде, Питер стал моим коллегой, которому я доверяю во все времена — и в хорошие, и в плохие. Как показали тесты, ко времени отъезда в Австралию моя программа автоматического поиска сверхновых уже более-менее работала.

По приезде в Австралию несколько недель ушло на обустройство, а между тем наступило время очередных наблюдений в Чили. Однако я решил не ехать туда и остаться в Австралии. Мы с семьёй всё ещё находились в процессе переезда, моя жена только начала работать, а четырёхмесячный сын не так хорошо спал по ночам, как мы надеялись. Когда мы стали внедрять новую технику обработки данных в СТЮ, возникли некоторые проблемы. Компьютерная система в СТЮ существенно отличалась от той, которую я использовал в Австралии, поэтому мои программы не работали. Кроме того, интернет-связь между Австралией и Чили в то время была настолько медленной (1 символ в секунду), что было невозможно сделать что-либо удалённым способом. Работая вместе с очень терпеливым Марио Хамуем, мы медленно решали возникающие проблемы. Обычно я отправлял по электронной почте части кода, которые нужно было вставить в программу обработки изображений, а Марио отвечал, как это работает.

Наши первые наблюдения были проведены 25 февраля и в ночь на 6 марта 1995 г. Обработка данных этих наблюдений привела к полной катастрофе — казалось, что ничего не работает, и я не мог перекачать данные в Австралию, чтобы разобраться, в чём дело. Мы попробовали заказать доставку записей изображений курьерской почтой в Австралию, но посылка потерялась и так и не пришла. Тогда при работе с коллаборацией СТЮ мы стали аккуратно тестировать мою процедуру обработки изображений. Для этого мне в Австралию по электронной почте отправлялись отдельные участки изображений размером 16×16 пикселей. Используя эти мини-изображения параллельно с разговором по телефону, мне предстояло разобраться, что к чему. В ночь на 26 и 29 марта проходили наши наблюдения, а к 30 марта надо было написать заявку на продолжение нашей программы. Где-то 27 марта на кусочках изображений, присылаемых мне, стали появляться интересные новые объекты. Некоторые из них оказались астероидами, потому что было видно, как они перемещаются по небу, а один оказался на краю далёкой галактики. Объект был виден на снимке 6 марта, но отсутствовал на снимке 24 марта (данные, полученные этой ночью, были некачественными, так что нельзя было исключить, что объект также был астероидом). Мы включили этих кандидатов в заявку на продолжение нашей программы и послали её. При анализе данных, полученных 29 марта, в череде бесконечных кусочков изображений, присылаемых мне в Австралию, обнаружился один (его номер был S14) весьма интересный объект. Это был новый объект на фоне

Observing Proposal
Cerro Tololo Inter-American Observatory

Date: September 29, 1994 Proposal number:

TITLE: A Pilot Project to Search for Distant Type Ia Supernovae

PI: N. Suntzeff Grad student? N nsuntzeff@ctio.nso.edu
CTIO, Casilla 603, La Serena Chile 56-51-225415

CoI: B. Schmidt Grad student? N brian@cfanewton.harvard.edu
CfA/MSSSO, 60 Garden St., Cambridge, MA 02138 617 495 7390

Other CoIs: C. Smith, R. Schommer, M. Phillips, M. Hamuy, R. Aviles (CTIO); J. Maza (UChile); A. Riess, R. Kirshner (Harvard); J. Spyromillo, B. Leibundgut (ESO)

Abstract of Scientific Justification:

We propose to initiate a search for Type Ia supernovae at redshifts to $z \sim 0.3 - 0.5$ in equatorial fields using the CTIO 4m telescope. This program is the next step in the Calán/Tololo SN survey, where we have found ~ 30 Type Ia supernovae out to $z \sim 0.1$. The proposed program is a pilot project to discover fainter SN Ia's using multiple-epoch CCD images from the 4m telescope. We will follow up these discoveries with CCD photometry and spectroscopy both at CTIO and at several observatories in both hemispheres. With the spectral classification and light curve shapes, we can use our calibrations of the absolute magnitudes of SN Ia's from the Calán/Tololo survey to place stringent limits (Figure 2) on \dot{m} in a reasonable time-frame. Based on the statistics of discovery from the Calán/Tololo SN survey, we can expect to find about 3 SNe Ia per month.

Рис. 4. Заявка на наблюдения группы поиска сверхновых на больших красных смещениях.

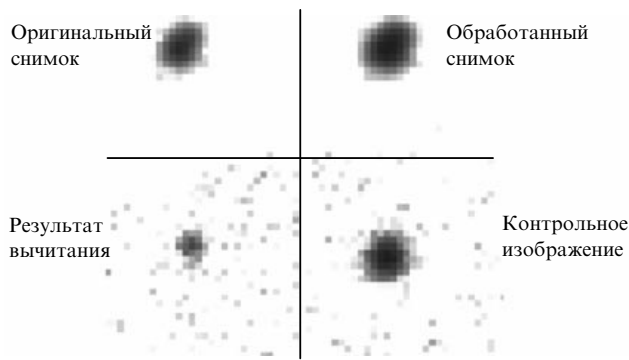


Рис. 5. Оригинал участка изображения C14 (с дефектами). Этот источник был подтверждён как сверхновая SN 1995K на красном смещении $z = 0,479$ — самая далёкая из открытых к апрелю 1995 г. Снимок 29 марта (вверху слева) сравнивался (вверху справа) со снимком, сделанным в феврале (внизу справа). Оставшееся после вычитания изображение показано внизу слева.

спиральной галактики, он не двигался и казался слабее на наших плохих снимках от 24 марта (рис. 5). В волнении я позвонил в СТЮ, чтобы они посмотрели весь снимок, и получил от них положительный ответ — да, он выглядел как сверхновая!

На спектрографе 4-метрового телескопа СТЮ Марк Филлипс получил спектр галактики. Оказалось, что она находится на красном смещении $z = 0,48$, что делало найденный объект потенциально самой далёкой из открытых к тому времени сверхновых. Но спектр этого слабого объекта нельзя было снять на фоне гораздо более яркого света галактики. Для последующих наблюдений вновь открытых объектов Бруно и Джейсон имели время на телескопе NTT (New Technology Telescope) Европейской южной обсерватории (ESO) в Ла Силле (La Silla) 3 апреля. Благодаря их героическим усилиям (они наблюдали объект всю ночь), после обработки данных, занявшей целую неделю, по спектру NTT стало ясно, что этот источник действительно является SN Ia. При написании циркуляра МАС (IAU) нам нужно было как-то назвать свою группу и за неимением лучшего мы выбрали "Группа по изучению сверхновых на больших красных смещениях" (High-Z SN Search Team).

В последующие дни Ник, Марк и Боб Шоммер убедили Аллана Дресслера (Allan Dressler) из института Карнеги снять серию снимков SN 1995K на телескопе ДюПона (DuPont) в обсерватории Лас Кампанас (Las Campanas). Эти данные вместе с данными, полученными ранее в СТЮ и ESO, показали, что кривая блеска соответствует далёкой SN Ia. В сентябре 1995 г. мы представили полученную кривую блеска и место сверхновой на хаббловской диаграмме в нашей заявке на новое время на телескопе. Хотя из анализа данных с SN 1995K формально следовало, что $q_0 = -0,6$, ошибки измерений были столь велики, что требовалось не менее 10 похожих объектов для получения статистически значимого результата измерений, и мы не придали особого значения полученной величине (рис. 6).

В 1995 г. к нашей группе присоединились страстные исследователи сверхновых Александро Клоккиатти (Католический университет Чили, Alejandro Clocchiatti) и Алекс Филиппенко (Беркли, Alex Filippenko), а также учёные, не являющиеся экспертами по сверхновым, Джон Тонрай (Гавайи, John Tonry), Крис Стаббс (Chris Stubbs) и Крег Хоган (Craig Hogan) (Университет Вашингтона). Они имели богатый индивидуальный научный опыт, а также ресурсы наблюдательного времени на телескопах их институтов.

Александро Клоккиатти работал над диссертацией в Университете Техаса и изучал SN Ib/c. Эти яркие сверхновые могли испортить выборку в нашем эксперименте, и для отбраковки этих источников требовался его опыт. Александро имел чилий-

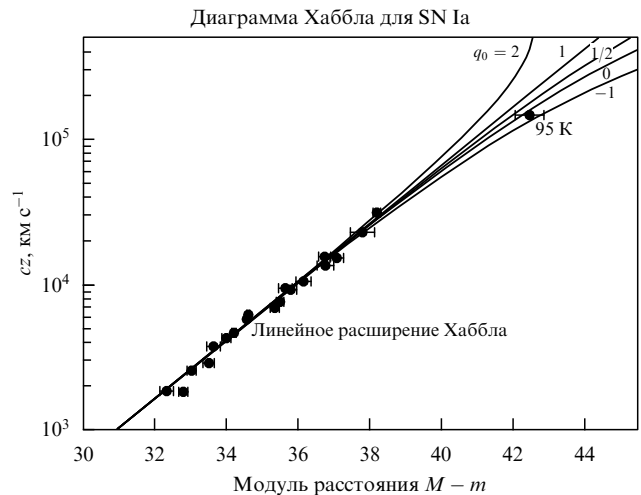


Рис. 6. SN 1995K на хаббловской диаграмме (из нашей заявки на наблюдения 1995 г.).

ское гражданство, мог лично присутствовать при проведении наблюдений, а мы могли получать дополнительный доступ к телескопам в Чили.

Алекс Филиппенко, один из ведущих мировых специалистов по наблюдениям сверхновых, спрашивал меня о возможности присоединиться к нашему проекту по поиску сверхновых на больших красных смещениях ещё в 1995 г. Тогда мы ему отказали, так как не хотели, чтобы это выглядело как переманивание коллег из конкурирующей научной группы. К концу 1995 г. стало ясно, что опыт Алекса и доступ к телескопу им. Кека (Keck) очень существенны для нашего эксперимента по измерению q_0 . Так что, когда в 1996 г. он вновь спросил о возможности присоединиться к нашей группе, мы немедленно сказали "да".

Джон Тонрай широко известен как один из опытнейших астрономов-наблюдателей нашего времени; кроме этого, он давал возможность получить доступ к телескопам Гавайского университета. Во время командировок на Гавайи я обсуждал с Джоном текущие недостатки нашего эксперимента. Он немедленно принялся за написание программ, помогающих открывать и анализировать SN Ia. За короткое время им был создан интерактивный интерфейс по поиску новых объектов, пакет программ по спектральному анализу (SNID, который до сих пор активно используется астрономами), а также ядро нашего пакета программ по фотометрическому анализу.

Крис Стаббс был одним из членов проекта MACHO по гравитационному микролинзированию, который проводился на 50-дюймовом телескопе в обсерватории Маунт-Стромло, он имел значительный опыт в анализе больших массивов данных, которого не было у нашей группы.

Крег Хоган был известным теоретиком, у которого я учился космологии в Университете Аризоны, пока он не переехал в Университет Вашингтона. Я полагал (и до сих пор так думаю), что во всякой большой наблюдательной программе должен участвовать хотя бы один теоретик, а Крег был специалистом именно в нужной нам области.

Члены нашей группы находились в разных местах, поэтому нам приходилось каждый год собираться вместе для обсуждения наших наблюдений и методики определения параметра q_0 из них. Первая встреча состоялась в 1996 г. в Гарварде. Нам только что выделили время для наблюдений на космическом телескопе им. Хаббла из резерва научного директора проекта и требовалось обсудить, как наиболее эффективно использовать этот громадный ресурс. Мы решили расширить нашу наблюдательную базу с помощью новой широкопольной камеры, установленной на Канадско-французском Гавайском телескопе на Мауна Кеа (Mauna Kea) и привлечь в проект астронома Гавайского университета и члена нашей группы Джона Тон-

рая, имеющего доступ к этому уникальному прибору. Организация наблюдений далёких сверхновых на двух телескопах дважды в год отнимала у меня и моих коллег довольно много времени.

Каждый наблюдательный сет представлял собой организованный хаос. Мне нужно было приехать в обсерваторию за неделю до начала наблюдений для отладки последней версии программного обеспечения. Поскольку у нас не было специального оборудования, каждый раз всё требовалось переустанавливать заново, а это никогда не проходит гладко. На каждом инструменте была своя операционная система, хотя и на базе UNIX, поэтому программы нужно было компилировать каждый раз индивидуально. Из-за большого объёма наших данных требовалось работать на многих компьютерах и дисках, — а они каждый раз менялись. В течение этой подготовительной недели вся группа работала по 20 часов в день, чтобы быть уверенными в быстром открытии сверхновых. Эти усилия приводили к интересному виду релаксации — Боб Шоммер играл в "Джеймса Брауна" в комнате управления телескопом. Такая напряжённая работа иногда приводила к ошибкам. Так, однажды ночью в комнате управления 4-метровым телескопом СТЮ Алехандро Клоккиатти следил за моим полубезумным постукиванием по клавиатуре компьютера и вдруг, внезапно поблдеув, сказал: "Мне кажется, что ты не хотел этого делать". Оказалось, что я случайно стёр все данные, полученные за ночь наблюдений! Пока мы думали, как преподнести эту новость Никю, который управлял телескопом, Ник внезапно спросил: "Что случилось со всеми данными?" Мне показалось, будто вся моя научная карьера пошла прахом, но скоро я сообразил, что данные были сохранены (процедурой, которую я считал избыточной), так что стёртые файлы были восстановлены и мы продолжили наблюдения.

Последующие спектроскопические наблюдения в основном проводились на телескопе им. Кека благодаря времени, выделенному Алексу Филлипенко (через Калифорнийский университет) и Джону Тонраю (через Гавайский университет), как правило, через несколько дней после открытия сверхновой. Неудача с быстрым спектроскопическим подтверждением сверхновой привела бы к бесполезности всех наших наблюдений. Несмотря на некоторый хаос, в течение 1995–1997 гг. нам удалось открыть, спектроскопически подтвердить и отфотометрировать кривые блеска 16 удалённых сверхновых типа Ia. Этого было достаточно, чтобы статистически значимо изменить параметр замедления.

В начале 1997 г. большая часть нашей группы собралась в Сизтле в Университете Вашингтона и мы решили, что первым автором каждой статьи будет студент или молодой постдок из нашей группы. Я должен был написать первую статью с представлением программы и первого источника, SN 1995K. Питеру Гарнавичу поручили создать вторую большую статью, которая включала бы объекты, наблюдавшиеся космическим телескопом им. Хаббла и содержала бы первые статистически значимые результаты измерения q_0 . Наконец, Адам Рисс должен был написать следующую работу об уточнении параметра q_0 по всем данным за несколько лет. Обработчики данных нашей группы (я, Адам Рисс, Пит Чаллис, Саурабх Джха (Saurabh Jha), Алехандро Клоккиатти, Давид Райсс и Ал Диркс (Al Diercks)) на неделю остались в Сизтле для совместной работы. Первоначально планировалось, что это будет рабочая неделя, в течение которой я буду учить, как проводить фотометрические наблюдения далёких сверхновых, и мы вместе будем анализировать наши данные. Нам не удалось приступить к обработке данных, но неделя превратилась в интенсивное рабочее совещание, во время которого мы обсудили все основные проблемы, касающиеся успешного завершения нашего эксперимента. Это была одна из наиболее запомнившихся мне недель работы нашей группы по изучению сверхновых на больших красных смещениях. Пока комета Хейла-Боппа невидимо блистала за завесой вечной сизтловской дымки, мы

проводили наш 16-часовой рабочий день в подвале физического факультета Университета Вашингтона, делая перерыв на просмотр фильма "Swing Blade" по просьбе Адама Рисса.

В течение нескольких последующих лет моя жизнь была подчинена наблюдательным сетам по открытию сверхновых, обработке фотометрических данных и написанию статьи о нашей программе поиска сверхновых и открытию SN 1995K. Статья была в основном закончена в 1996 г., но возрастающий объём данных наблюдений не давал мне закончить работу над ней. Вдобавок, указание об ускоренном расширении Вселенной, следовавшее из данных о SN 1995K, вызывало определённую неуверенность. Имелось много возможных систематических эффектов, из-за которых результат всего эксперимента мог оказаться неверным, и я исследовал каждый из них по очереди.

7. Систематические эффекты

В ближайшей Вселенной мы наблюдаем SN Ia в различном окружении и примерно в 10% случаев в направлении на объект заметную роль играет межзвёздное поглощение света. Мы могли внести поправку на поглощение по наблюдаемым цветам сверхновых и устранить эффекты первого порядка, связанные со средним поглощением для сверхновых с красными смещениями от $z = 0$ до $z = 0,5$. В своей диссертации Адам Рисс разработал специальную технику учёта поглощения межзвёздной пылью, основанной на цветах сверхновых [26]. Это было существенной частью работы по аккуратному измерению относительных расстояний до сверхновых типа Ia, она до сих пор используется во всех методах измерения расстояний до сверхновых.

Наши открытия как близких, так и далёких сверхновых подвергались влиянию ряда эффектов селекции. Самым существенным является так называемый эффект Мальмквиста (Malmquist bias). Он заключается в том, что при поиске объектов с ограниченной яркостью чаще встречаются объекты более яркие, чем в среднем, вблизи верхнего предела блеска. Это связано с тем, что ярчайшие объекты видны с больших расстояний, т.е. из большего объёма, чем в среднем. Ошибки, вызванные эффектом Мальмквиста, пропорциональны квадрату собственной дисперсии метода определения расстояний, но поскольку SN Ia являются сами хорошими индикаторами расстояний, ошибка Мальмквиста оказывается малой, примерно 2%. В 1995 г. я написал программу по моделированию этого эффекта методом Монте-Карло. Таким образом, этот эффект был учтён при анализе наших данных.

Сверхновые наблюдались со всё больших красных смещений, и их спектры смещались в красную сторону. Поскольку астрономические наблюдения обычно проводятся в фиксированных спектральных полосах (фильтрах) на Земле, требовалось ввести поправку на красное смещение спектра внутри этих фильтров (так называемая K-поправка). Группа SCP показала, что эти эффекты можно минимизировать, если использовать разные фильтры для наблюдения сверхновых на разных красных смещениях (наиболее близкие полосы к сдвинутому красным смещением стандартным фильтрам в собственной системе отсчёта источника) [27]. Наша группа по поиску далёких сверхновых сделала ещё один шаг вперёд и разработала специальные фильтры, имитирующие стандартные полосы на $z = 0$ для разных красных смещений.

Наблюдения показывают, что близкие сверхновые типа Ia эволюционируют. В работе [28] кривые блеска SN Ia из обзора Калан/Толлоло сравнивались для разных типов галактик. Кривые блеска SN в галактиках ранних типов (без активного звездообразования) систематически эволюционировали быстрее, чем SN из галактик поздних типов (с активным звездообразованием). Этот эффект мог бы стать непреодолимой проблемой для использования SN Ia с целью определения параметра q_0 , если бы не тот факт, что исправленная из-за скорости убывания абсолютная светимость сверхновой почти не коррелировала с типом хозяйской галактики.

8. Космология за пределами нормального вещества

Начиная с 1917 г., когда Эйнштейн впервые добавил космологическую постоянную в свои уравнения, этот странный коэффициент в некоторых случаях привлекался для объяснения астрономических наблюдений, которые не укладывались в рамки стандартной модели, описанной выше. Космологическая постоянная приобрела дурную репутацию как неправильно введённый коэффициент для получения решения уравнений, которое впоследствии было опровергнуто наблюдениями.

В 1995 г. я был рецензентом статьи Губара и Перлмуттера [29], в которой ставился вопрос, можно ли получить значимые ограничения на величину космологической постоянной из наблюдений далёких SN Ia. В своём отзыве я поставил под сомнение ценность статьи — мне казалось, что авторам не удалось убедительно продемонстрировать возможность получения значимых пределов для космологической постоянной из этих наблюдений. Если бы космологической постоянной не было, то неопределённость в её измерениях по SN Ia были бы достаточно велики (см. рис. 2 из работы [29]). Тогда я не понял — настолько сильны были мои предрассудки против космологической постоянной, — что если космологическая постоянная отлична от нуля (см. рис. 3 из работы [29]), то из измерений SN Ia можно получить значимые ограничения на её величину.

Проблема космологической постоянной не была для меня новой. В 1992 г. Шон Кэрролл написал о ней большой обзор, в то время мы вместе с ним сидели в одном офисе, будучи аспирантами [30]. Я вспоминаю, как он продирался через сотни жёлтых пометок, усеявших его манускрипт, которые сделал рецензент Алан Сэндидж, а я подтрунивал над его стремлением написать статью о таких глупостях, как космологическая постоянная. В конце концов этот обзор оказался мне чрезвычайно полезен, когда передо мной встала проблема интерпретации наблюдений SN 1995K, указывающих на отрицательное значение параметра замедления q_0 .

При написании статьи по результатам проекта поиска далёких сверхновых [31] теоретик нашей группы Крег Хоган убедил меня выйти за рамки понятия параметра замедления q_0 . Его особенно интересовало, можно ли отойти от предположения, что наша Вселенная заполнена только веществом, постулируя наличие других составляющих с разными свойствами. В этой работе мы интерпретировали результаты измерений в рамках терминов, принятых в астрофизике элементарных частиц. Мы записали уравнение Фридмана (2) для всех сортов материи в виде

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G \rho_{\text{tot}}}{3} - \frac{k}{a^2}, \quad (9)$$

а каждый вид материи характеризовали долей по отношению к критической плотности:

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{crit}}} \equiv \frac{\rho_i}{3H_0^2/8\pi G}, \quad (10)$$

и своим уравнением состояния:

$$w_i = \frac{P_i}{\rho_i c^2}. \quad (11)$$

Уравнение состояния обычной материи в космологии есть $w = 0$, для космологической постоянной $w = -1$, а для фотонов (излучения) $w = 1/3$.

В этих терминах выражение для фотометрического расстояния имеет менее тривиальный вид:

$$D_L H_0 = c(1+z) \Omega_k^{-1/2} S(x) \times \left\{ \Omega_k^{1/2} \int_0^z dz' \left[\Omega_k (1+z')^2 + \sum_i (1+z')^{3+3w_i} \right]^{-1/2} \right\}, \quad (12)$$

где $S(x) = \sin(x)$, x или $\sinh(x)$ для замкнутой, плоской и открытой модели соответственно, а Ω_k — параметр кривизны, определяемый как $\Omega_k \equiv 1 - \sum_i \Omega_i$. При наличии разных форм материи формула Маттига для D_L (8) уже непригодна, однако разложение (6) по параметру q_0 остаётся верным, при этом сам параметр q_0 даётся выражением

$$q_0 \equiv \frac{-\ddot{a}(t_0)a(t_0)}{\dot{a}_0^2} = \frac{1}{2} \sum_i \Omega_i (1+3w_i). \quad (13)$$

9. Открытие ускоренного расширения

К середине 1997 г. нашей группой по изучению далёких сверхновых были проведены наблюдения четырёх объектов с помощью космического телескопа им. Хаббла, и ещё десять более удалённых объектов должны были наблюдаться для достижения конечной цели проекта — измерения q_0 . Однако имелись некоторые проблемы, связанные со статистикой, которые необходимо было решить. В принципе, измерить q_0 можно из наблюдения нескольких SN с известным красным смещением и расстоянием. Красные смещения измеряются с высокой точностью, а ошибки при измерении расстояний подчиняются нормальному распределению. Казалось бы, классический метод χ^2 вполне подходит. Исключения составляют области в пространстве параметров, в которых точная формула Маттига (уравнение (8)) неверна, и объекты, для которых разложение в ряд Тейлора (5) не является точным. С другой стороны, уравнение (12) включает все возможности, однако в пространстве параметров были области недопустимых значений, такие как, например, вещество с отрицательной энергией. В 1996 г. при обсуждении в СТЮ этого вопроса с коллегами из группы SCP выяснилось, что обе группы озадачены этими статистическими проблемами — не то чтобы они были неизвестны науке, а просто мы были новичками в этой области. Вот мы и думали, как найти решение. Адам Рисс, который в своей диссертации подробно занимался статистическими методами, после обсуждения этих вопросов с Биллом Прессом предложил обратить критерий χ^2 в вероятность, наложить предварительные условия на эту вероятность (например, запретить отрицательное вещество) и проинтегрировать по этому пространству для нахождения распределения вероятности интересующих нас параметров. Сегодня это кажется вполне обычным делом, но в 1996 г. никто из нас не мог припомнить, чтобы такой метод применялся прежде в астрономических исследованиях. Это было довольно нетривиальным делом с вычислительной точки зрения, так что Адам Рисс, Питер Гарнавич и я независимо написали программы для этих вычислений.

Данные наблюдений с космического телескопа им. Хаббла, которые анализировал Питер Гарнавич, были превосходными и их, следовательно, было легко обрабатывать. К сентябрю анализ был завершён. Из него однозначно следовало, что $q_0 \neq 0,5$, так что модель Вселенной, заполненной одним веществом, исключалась. Этот вывод, однако, казался противоречащим результатам работы группы SCP [32]. Черновик статьи, написанный Питером, вызвал неоднозначную реакцию среди участников нашей группы — так ли был надёжен учёт систематических ошибок? Можем ли мы доказать, что полученный результат верен? Эти вопросы заставили нас изучить все возможные источники систематических ошибок. Хотя мы так и не пришли к полному согласию (Крис Стаббс, который получил образование в области физики частиц, был особенно критически настроен относительно нашей способности контролировать все ошибки), наша группа потихоньку справлялась с проблемами. У нас с женой как раз родился второй ребенок и я, должен признаться, не слишком хорошо координировал работу участников группы при решении этих вопросов. А через несколько месяцев ситуация стала куда более интересной.

В ноябре 1997 г. Адам Рисс закончил измерения своей первой выборки сверхновых. Этот успех был достигнут благо-

даря его уникальной способности всецело сосредотачиваться на одной проблеме. Он выслал мне рисунок по электронной почте, в теме письма значилось: "Что ты думаешь?". Я взглянул на рисунок и увидел, что его выборка далёких сверхновых Ia была значительно слабее, чем должно было быть даже в модели с $q_0 = 0$. Казалось, что Вселенная ускоряется! Я, помнится, подумал: "Что же это такое Адам сделал?" и между нами началась долгая переписка, многочисленные проверки результатов, уточнение методов анализа. В то же время я готовил к отправке в печать нашу статью, которую я поклялся отослать в 1997 г., и закончил работу над ней как раз накануне новогоднего вечера. Наконец, 8 января 1998 г. (по австралийскому времени) Адам и я согласовали все детали вычислений, показывающих, что Вселенная расширяется с ускорением, и я послал ему письмо по электронной почте с темой: "Привет, Лямбда!" и картинку с моими вычислениями. До этого времени большинство участников нашей группы не знали об этих результатах. Адам показал свою работу Алексу Филиппенко и мы сообщили наши выводы Питеру Гарнавичу, который на следующий день представлял свою работу, описанную выше, на ежегодном съезде Американского астрономического общества (AAO).

Полученный результат меня озадачил. Космологическая постоянная имела долгую историю, она была введена для объяснения наблюдений, которые позднее оказались ошибочными. К тому же результаты группы SCP, опубликованные в статье 1997 г., настолько расходились с нашими, что мне казалось, что никто серьёзно не воспримет наш безумный вывод. Чего я не видел, так это препринта группы SCP, выложенного в астрофизический архив 17 декабря 1997 г. Я узнал о нём только после пресс-конференции ААО, состоявшейся 8 января 1998 г. [33]. Из этой работы следовало, что новое значение q_0 получается гораздо меньшим, чем в предыдущих измерениях.

9 января на работе Питер Гарнавич рассказал мне о пресс-конференции ААО. Сол Перлмуттер представил данные наблюдений с космического телескопа им. Хаббла, которые показывали, что расширение Вселенной не замедляется (эти данные вошли в их статью в журнале *Nature*). Кроме того, он представил диаграммы для 40 сверхновых из их выборки, которые

показывали тот же результат, что получила и наша группа. Эти сверхновые были систематически слабее, чем ожидалось при расширении Вселенной, заполненной обычным веществом. Однако группа Сола пока что не учла поправки из-за поглощения пылью, которые были встроены в нашу процедуру обработки данных с самого начала. У Адама Рисса на той неделе как раз была намечена свадьба, и после его возвращения из короткого медового месяца нашей группе предстояла большая работа по тщательной проверке всех этапов анализа данных. Реакция наших сотрудников была неоднозначной — некоторые были вдохновлены открытием, кое-кто был настроен скептически, но всем было ясно, что предстоит долгий путь, для того чтобы с уверенностью говорить о безошибочности полученного результата. Я разделял скептическую точку зрения, но, с другой стороны, мне казалось, что было бы неправильно не публиковать результат только на том основании, что он кому-то не нравится. Я призвал сотрудников всеми способами проверить наши выводы до их публикации. Оставшиеся дни января и весь февраль группа под руководством Адама Рисса проводила всевозможные тесты, и к концу февраля мы пришли к согласию о содержании работы. Мы были готовы объявить наш результат. Алекс Филиппенко представил выводы нашей группы на совещании в Калифорнии в конце февраля, и это вызвало сенсацию в средствах массовой информации в США. Спустя неделю мы направили статью "Наблюдательные свидетельства космологической постоянной и ускоренного расширения Вселенной" в *Астрономический журнал* (Astronomical Journal). В течение нескольких месяцев после этого в дополнение к продолжающимся наблюдениям далёких сверхновых по нашей программе Питер Гарнавич провёл первый анализ данных, показывающий, что какова бы ни была субстанция, вызывающая ускоренное расширение, её уравнение состояния должно быть близким к космологической постоянной.

Казалось, мы сделали всё возможное с нашими данными для учёта систематических ошибок. Однако я не мог избавиться от чувства, что может произойти нечто неожиданное, что дезавуирует наши результаты. На языке министра обороны США мы учли известные неизвестные, но всегда могут найтись

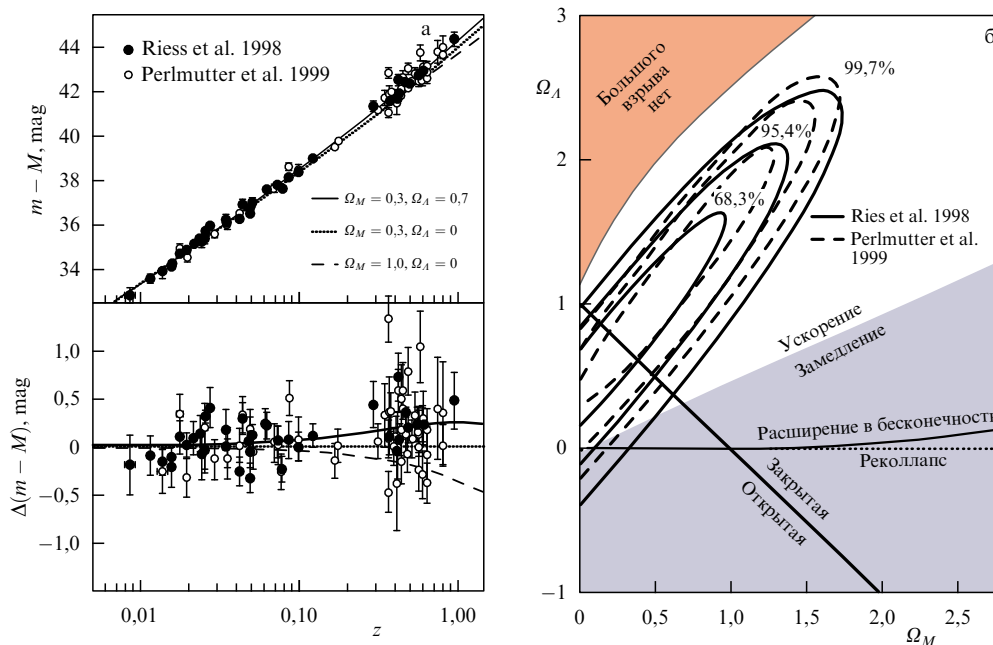


Рис. 7. (В цвете онлайн.) (а) Верхняя панель: хаббловские диаграммы SN Ia по данным нашего проекта поиска сверхновых на больших z и проекта SCP с фитированием по трём космологическим параметрам. Нижняя панель: остаточные отклонения для диаграмм с верхней панели в космологической модели, содержащей 30% обычного вещества. (б) Контуры равной вероятности для космологических параметров по данным SCP и нашего проекта. Результаты подгонки данных в обоих проектах практически совпадают и приводят к выводу, что Вселенная в значительной степени заполнена веществом с уравнением состояния, похожим на космологическую постоянную (цветная диаграмма).

неизвестные неизвестные, и это был сумасшедший результат. Я ожидал скептической реакции со стороны мирового научного сообщества, особенно по отношению к точности полученного результата.

А в это время группа SCP не покладая рук работала над своей собственной статьёй, и вскоре выяснилось, что результаты двух независимых экспериментов практически совпадают [34]. Их выборка сверхновых была представительнее нашей, однако наш предел чувствительности был выше, так что в конечном счёте значимость обоих результатов была практически одинаковой. Объединённый уровень доверия вывода об ускоренном расширении Вселенной в двух экспериментах оказался выше 4σ (рис. 7).

К моему удивлению, вывод об ускоренном расширении Вселенной был воспринят гораздо теплее, чем я ожидал. Я полагаю, такой тёплый приём частично объясняется тем, что две соревнующиеся группы наблюдателей независимо пришли к одному и тому же ответу. Но это открытие также разрешило некоторые проблемы превалирующей в то время космологической модели с холодной скрытой массой (Cold Dark Matter model, CDM), в которой начальные условия задавались эпохой инфляции [35]. Эта модель предсказывала геометрически плоскую Вселенную с начальными флуктуациями в виде практически масштабно-инвариантного гауссова случайного поля. Модель CDM вступала в противоречие с крупномасштабным распределением галактик, а также с измеренной в то время комбинацией постоянной Хаббла, средней плотности и возраста Вселенной. Было ясно, что добавление в модель космологической постоянной могло бы решить все эти проблемы [36–38].

В 2000 г. в экспериментах MAXIMA и Boomerang были проведены измерения реликтового излучения, которые убедительно показали, что Вселенная должна быть плоской с точностью до 10%, т.е. $\Omega_k \sim 0$ в уравнении (10) [39, 40]. Эти результаты практически невозможно было согласовать с нашими измерениями расстояний до сверхновых, если бы Вселенная не была заполнена чем-то вроде космологической постоянной. Именно в это время в 2000 г. я понял, что наш результат выдержит проверку временем.

10. Заключительные замечания

За 13 лет после открытия ускоренное расширение Вселенной подвергалось тщательной проверке в физике. С наблюдательной точки зрения возросший объём данных о сверхновых типа Ia улучшил точность измерения ускоренного расширения Вселенной, доведя её до предела систематических погрешностей [41–44].

Наблюдения реликтового излучения позволили измерить угловые расстояния до красных смещений $z \sim 1090$, а также дали информацию о начальных физических условиях во Вселенной сразу после Большого взрыва вплоть до эпохи рекомбинации [45]. По наблюдениям большого числа галактик были измерены барийные акустические осцилляции. Сегодня астрономия может связать масштаб Вселенной на красном смещении от $z \sim 1090$ до $z = 0,2$ [46], $z = 0,35$ [47] и $z = 0,6$ [48]. Все перечисленные выше измерения и другие результаты согласуются с космологической моделью, в которой ускоренное расширение Вселенной обусловлено космологической постоянной А. Эйнштейна ($\Omega_\Lambda \sim 0,73$, $w = -1$), Вселенная геометрически плоская, а в остальной части плотности доминирует холодное ($w = 0$) вещество [49], состоящее из барионов ($\Omega_b \sim 0,045$) и холодной тёмной материи ($\Omega_{\text{CDM}} \sim 0,225$). Эту базовую модель часто называют плоской Λ -CDM-моделью.

Открытие ускоренного расширения Вселенной вызвало огромное количество теоретических исследований. К сожалению, явного прорыва в нашем понимании этой проблемы пока не произошло — космическое ускорение остаётся столь же

загадочным, что и в 1998 г. Будущие эксперименты более точно проверят согласие плоской Λ -CDM-модели с данными наблюдений. Не исключено, что возникнет разногласие, отвергающее космологическую постоянную как причину ускоренного расширения, и теоретикам необходимо будет объяснять этот фундаментальный результат. Надо будет ждать теоретического озарения, которое по-новому истолкует стандартную космологическую модель, возможно, с помощью информации, полученной от совершенно неожиданного источника.

Перевёл с английского К.А. Постнов

Список литературы

1. Norton J *Hist. Stud. Phys. Sci.* **14** 253 (1984); reprinted in *Einstein and the History of General Relativity* (Einstein Studies, Vol. 1, Eds D Howard, J Stachel) (Boston: Birkhäuser, 1989) p. 101
2. de Sitter W *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **78** 3 (1917)
3. Einstein A *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* 142 (1917)
4. Friedman A *Z. Phys.* **10** 377 (1922)
5. Slipher V M *Proc. Am. Philos. Soc.* **56** 403 (1917)
6. Lemaître G *Ann. Soc. Sci. Bruxelles A* **47** 49 (1927)
7. Gaither C C, Cavazos-Gaither A E (Eds) *Gaither's Dictionary of Scientific Quotations* (New York: Springer, 2008)
8. Robertson H P *Philos. Mag.* **5** 835 (1928)
9. Hubble E *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **15** 168 (1929)
10. Sandage A *Astrophys. J.* **133** 355 (1961)
11. Mattig W *Astron. Nachr.* **284** 109 (1958)
12. Humason M L, Mayall N U, Sandage A R *Astrophys. J.* **61** 97 (1956)
13. Tinsley B M *Astrophys. J.* **178** 319 (1972)
14. Filippenko A V *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **35** 309 (1997)
15. Chandrasekhar S *Astrophys. J.* **74** 81 (1931)
16. Kirshner R P, Kwan J *Astrophys. J.* **197** 415 (1975)
17. Schmidt B P et al. *Astrophys. J.* **432** 42 (1994)
18. Leibundgut B, PhD Thesis (Basel: Univ. of Basel, 1988)
19. Leibundgut B et al. *Astrophys. J.* **371** L23 (1991)
20. Phillips M M et al. *Astron. J.* **103** 1632 (1992)
21. Filippenko A V et al. *Astrophys. J.* **384** L15 (1992)
22. Spyromilio J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **258** 53P (1992)
23. Leibundgut B et al. *Astron. J.* **105** 301 (1993)
24. Filippenko A V et al. *Astron. J.* **104** 1543 (1992)
25. Phillips M M *Astrophys. J.* **413** L105 (1993)
26. Riess A G, Press W H, Kirshner R P *Astrophys. J.* **473** 88 (1996)
27. Kim A, Goobar A, Perlmutter S *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **108** 190 (1996)
28. Hamuy M et al. *Astron. J.* **112** 2391 (1996)
29. Goobar A, Perlmutter S *Astrophys. J.* **450** 14 (1995)
30. Carroll S M, Press W H, Turner E L *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **30** 499 (1992)
31. Schmidt B P et al. *Astrophys. J.* **507** 46 (1998)
32. Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **483** 565 (1997)
33. Perlmutter S et al. *Nature* **391** 51 (1998); *Nature* **392** 311 (1998)
34. Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
35. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
36. Efstathiou G, Sutherland W J, Maddox S J *Nature* **348** 705 (1990)
37. Krauss L M, Turner M S *Gen. Relativ. Gravit.* **27** 1137 (1995)
38. Ostriker J P, Steinhardt P J *Nature* **377** 600 (1995)
39. Hanany S et al. *Astrophys. J.* **545** L5 (2000)
40. de Bernardis P et al. *Nature* **404** 955 (2000)
41. Wood-Vasey W M et al. *Astrophys. J.* **666** 694 (2007)
42. Hicken M et al. *Astrophys. J.* **700** 1097 (2009)
43. Kessler R et al. *Astrophys. J. Suppl.* **185** 32 (2009)
44. Guy J et al. *Astron. Astrophys.* **523** A7 (2010)
45. Komatsu E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **192** 18 (2011)
46. Percival W J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401** 2148 (2010)
47. Eisenstein D J et al. *Astrophys. J.* **633** 560 (2005)
48. Blake C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** 2892 (2011)
49. Sullivan M et al. *Astrophys. J.* **737** 102 (2011)