

Мой путь к ускоряющейся Вселенной

А. Дж. Рисс

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

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

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201310g.1090

Содержание

1. Введение (1090).
 2. Получение образования космолога (1090).
 3. Формирование группы по поиску сверхновых на больших красных смещениях (High-Z Team) (1093).
 4. Ускоряющаяся Вселенная (1094).
 5. Экстраординарные утверждения требуют экстраординарных доказательств (1096).
- Список литературы (1098).

1. Введение

Я думаю, что расширение Вселенной является одним из самых удивительных природных феноменов. Я бы никогда не догадался об этом. Даже изучив школьный курс физики, я считал, что Вселенная вечная, статичная и находится в состоянии равновесия. Я был поражён, когда в студенческие годы узнал о том, что Вселенная расширяется. И я понял, что, измеряя расширение Вселенной, подобно тому, как отмечают рост ребенка на косяке двери (рис. 1)¹, можно определить *возраст* Вселенной и предсказать её будущее. Это было потрясающе! Я осознал тогда, что это именно то, чем мне хотелось бы заниматься. С тех пор картографирование расширяющейся Вселенной с целью узнать её природу стало моей страстью. Хотелось бы добавить, что, зная сейчас, что Вселенная не просто расширяется, а ещё и с *ускорением*, я сравниваю себя с королём Кастилии Альфонсо X, который, как говорят, ознакомившись с системой мира Птолемея, произнес знаменитую фразу: "Если бы всемогущий Господь посоветовался со мной, прежде чем совершать свои творения, я бы порекомендовал ему что-нибудь попроще".

2. Получение образования космолога

Летом после первого года обучения в высшей школе я месяц провёл в Научной школе губернатора Нью-Джерси. Меня привлекли курсы по генной инженерии, но неожиданно для себя я выбрал лекции по специальной теории относительности Эйнштейна. Меня, как говорят, "зацепило", когда на лекциях доктор наук Джим Сапли (Jim Supplee) из Университета Дрю (Drew) объяснял феномены замедления времени, лоренцева сокращения длины и относительности одновременности. С 1988 по 1992 гг. я изучал физику в Массачусетском технологическом институте (MIT). "Курс 8", как назывался курс

физики в MIT, был непростой и требовал большого усердия, и именно в MIT, как нигде до и после, произошло развитие моих способностей как учёного. Наиболее трудным, но плодотворным курсом была так называемая лаборатория молодых (Junior Lab) — практикум, в котором мы воспроизводили великие эксперименты нобелевских лауреатов первой половины XX века. Мне понравился сам процесс, посредством которого экспериментаторы и наблюдатели проводили измерения на установках, а затем превращали результаты в научные утверждения и проверяли различные гипотезы. В своей научной деятельности я остался стойким приверженцем "обработки и анализа данных".

Когда я заканчивал MIT, профессор Роберт Киршнер (Robert Kirshner), бывший тогда заведующим кафедрой астрономии в Гарвардском университете, позвонил мне и сказал, что меня принимают в аспирантуру по программе астрономии и я нахожусь в листе ожидания по программе физики. Он поинтересовался, не хочу ли я ознакомиться, чем он занимается, и предложил, как это принято, оплатить мои транспортные расходы. Поскольку астрономическое отделение было рядом, он сказал, что билет на метро ("Т"-жетон) выслан мне почтой! Я проехал две остановки на метро по красной ветке, меня встретил и проводил аспирант Брайан Шмидт (Brian Schmidt). Позже я многому научился у него, но тогда мы просто обсуждали аспирантскую жизнь. Я решил пойти в Гарвардский университет для получения кандидатской степени по астрономии. В астрономии я почти ничего не знал, но в глубине души желал получить её изучить. Летом перед поступлением в аспирантуру я работал по проекту MACHO в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Ливерморе (Lawrence Livermore National Laboratory), где мельком встречался с Солом Перлмуттером (Saul Perlmutter). Так что ещё до обучения в аспирантуре я повстречал многих из тех, кто радикально повлиял на мою научную карьеру.

Единственный предварительный экзамен в Гарвардском университете в то время был основан на замечательной книге Франка Шу "Физическая Вселенная"², которую я прочитал от корки до корки. Когда я дошёл до главы 14, посвящённой расширяющейся Вселенной, и главы 15, посвящённой гравитации и космологии, я понял, чем именно я хотел бы заниматься — измерением скорости расширения Вселенной, точнее, темпа, с которым это расширение должно замедляться. В то время космологи не могли измерить этот темп — и соответственно возраст Вселенной — с точностью, лучшей, чем фактор 2. Что ещё хуже, неточные измерения скорости торможения расширения и возраста Вселенной, как говорилось в главе 15 и как подтвердили недавние работы Алана Сандиджа (Allan Sandage) и других, не позволяли также измерить плотность вещества во Вселенной и определить её будущую судьбу. Для решения обеих проблем требовалось прокалибровать расстояния вплоть до масштабов в миллиарды световых лет. Пока что лучшим индикатором расстояний были ярчайшие галактики в скоплениях.

Весной 1993 г. я беседовал с проф. Робертом Киршнером о теме моего будущего исследования. Киршнер со своим аспирантом

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

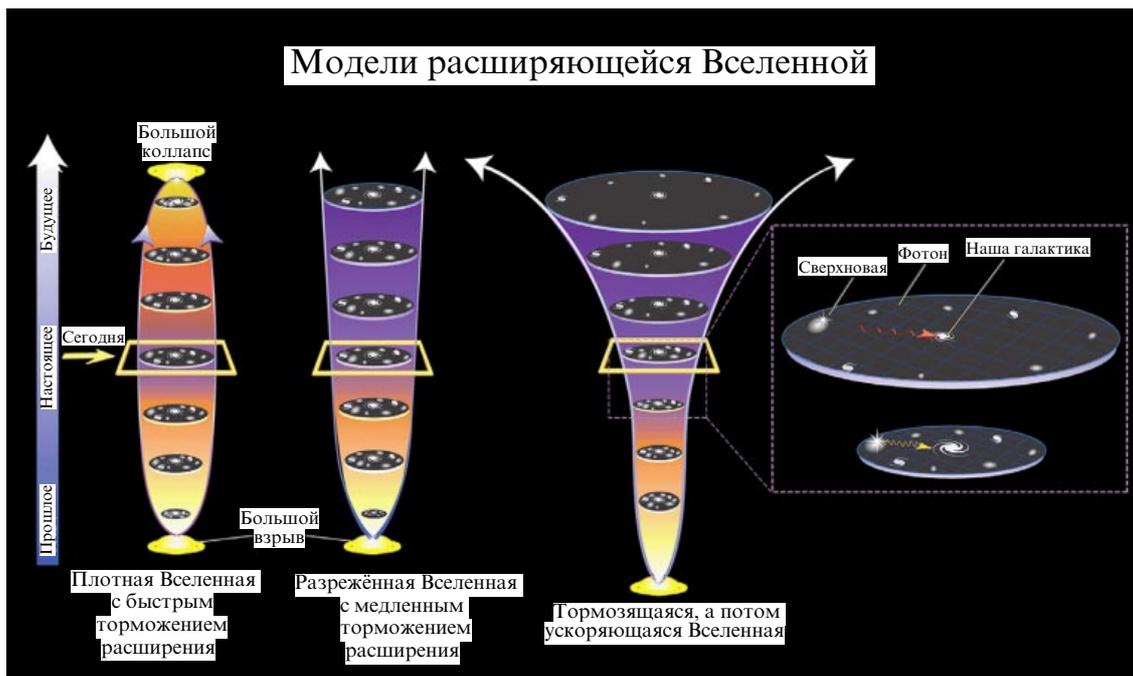


Рис. 1. (В цвете онлайн.) Модели расширяющейся Вселенной. Используется красное смещение и расстояние (яркость) сверхновых для нахождения изменения масштабного фактора со временем. Эти измерения создают картину истории расширения (цветная диаграмма).

Брайаном Шмидтом заканчивали работу по определению расстояний до коллапсирующих сверхновых. Он рассказал мне о новой работе Марка Филлипса (Mark Philips) из Межамериканской обсерватории Серро-Тололо (Cerro Tololo) о других индикаторах расстояния — сверхновых другого класса, называемых сверхновыми типа Ia. Предполагалось, что эти сверхновые взрываются, когда масса углеродно-кислородного белого карлика в процессе аккреции превосходит предел Чандрасекара. После взрыва их яркость возрастает, достигает наибольшего значения и затем убывает. Если все подобные взрывы одинаковы, то максимальную яркость можно было бы использовать как индикатор расстояния — блеск объекта уменьшается с увеличением расстояния. А поскольку сверхновые типа Ia являются самыми яркими среди сверхновых, достигая в максимуме блеска 4×10^9 светимостей Солнца, их можно наблюдать с огромных расстояний. Однако в этой процедуре была одна загвоздка. Не все сверхновые этого типа были идентичны; *собственная* светимость некоторых из них была больше других, поэтому расстояния до них недооценивались или переоценивались. Марк обнаружил, что *собственная* светимость в максимуме коррелирует со скоростью убывания блеска после пика. Чем медленнее уменьшался блеск, тем ярче была сверхновая в максимуме. Таким образом, скорость убывания блеска сверхновых Ia после его максимального значения можно было использовать для уточнения расстояний до них. К сожалению, оставалась проблема переменного поглощения света пылью на луче зрения, в результате которого ухудшалась точность измерения расстояний.

Для определения этих факторов группа, в которую вошли Марио Хамуй (Mario Hamuy), Марк Филлипс, Ник Санцефф (Nick Suntzeff), Роберт Шоммер (Robert Schommer) и Хоце Маза (José Maza), начала проведение масштабной наблюдательной кампании в Чили по измерению кривых блеска сверхновых типа Ia, так называемого обзора Калан/Тололо (Calan/Tololo Survey). Предполагалось, что в результате этого обзора произойдет прорыв в наших знаниях о сверхновых и будет получено надёжное доказательство возможности определения расстояний до них по измерению кривых блеска.

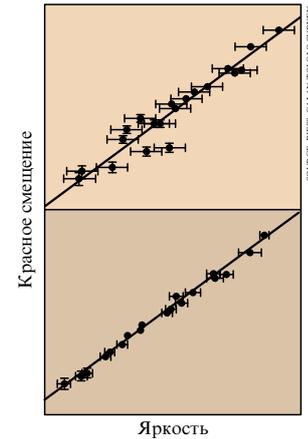
Боб Киршнер был мировым экспертом по наблюдениям сверхновых. Он также обладал универсальными познаниями и имел, как говорят, нюх на наиболее важные направления для исследований. Кроме того, у него была способность прекрасно организовывать деятельность своих студентов, снабжая их необходимыми ресурсами для успешной работы. Он предложил скооперироваться с другим профессором из Гарвардского университета, Уильямом Прессом (William Press), известным специалистом по численным методам и

обработке сложных данных (учёным широко известна его книга "Численные методы"³) (рис. 2). В первое рабочее лето дела шли медленно. Билл Пресс отсутствовал, и из его последней статьи "Интерполяция, реализация и восстановление зашумлённых, нерегулярных данных" [1] и препринта Марка Филлипса [2] мне предстояло найти надёжный алгоритм оптимального использования наблюдаемых кривых блеска сверхновых (т.е. возрастание, максимальное значение и уменьшение блеска в зависимости от времени) для предсказания их истинной светимости. В то время группа Калан/Тололо ещё не закончила свой обзор, так что у нас было мало данных, по которым можно было проверить новые алгоритмы определения максимального значения блеска сверхновых, а ещё хуже то, что большая часть имеющихся данных была фатально зашумлена. Бруно Лейбундгут (Bruno Leibundgut), впоследствии ставший одним из моих ключевых соавторов, составил в основном по данным фотографических наблюдений атлас исторических наблюдений сверхновых типа Ia, начиная с XIX в. Но из-за аналоговой природы фотопластинок не удалось надёжно отделить ослабевающий блеск сверхновой от фонового изображения хозяйской (host) галактики. Поэтому относительные скорости возрастания и уменьшения блеска, которые определялись моим новым алгоритмом, давали информацию не столько о блеске сверхновой, сколько об ошибках при вычитании фона хозяйской галактики. Для улучшения точности измерений кривых блеска сверхновых Ia требовалось наблюдать их с помощью более точных цифровых ПЗС-матриц.

В это время я учился у Брайана технике использования ПЗС-матриц для измерения блеска звёзд, и на ковре между нашими офисами появилась буквально протоптанная дорожка. Позднее мне довелось пару раз участвовать в наблюдениях на обсерватории Маунт Хопкинс (Mount Hopkins) вместе с Брайаном, Бобом и Питером Чаллисом (Peter Challis). Вместе с Бобом мы решили, что часть моей диссертации будет включать ПЗС-кривые блеска сверхновых, впервые полученные на северном небе (обзор Серро-Тололо проводился в южном полушарии). Я стал следить за циркулярами Международного астрономического союза⁴ (МАС), в которых публиковались сообщения об открытии (в большинстве своём любителями астрономии) только что взорвавшихся сверхновых типа Ia. Как только такая информация появлялась, мне необходимо было организовать (путём переговоров с другими наблюдателями)

³ William Press "Numerical Recipes".

⁴ International Astronomical Union.



Все сверхновые выстраиваются в ряд. Разброс точек на диаграмме звездная величина – красное смещение (относительное расстояние) показывает, что сверхновые типа Ia не являются идеальными стандартными свечами (сверху). Однако соотношение яркость – красное смещение улучшается, если учесть зависимость темпа спада кривой блеска от светимости в максимуме для разных сверхновых.

Рис. 2. Слева — (слева направо) Билл Пресс, Адам Рисс и Боб Киршнер в Гарвард-Смитсоновском астрофизическом центре. Справа — применение метода MLCS к близким сверхновым для разделения влияния эффектов расстояния, ослабления блеска и пыли на принимаемый поток излучения (из журнала *Science*, 1995 г.).

фотометрические наблюдения кривых блеска на 1,2-метровом телескопе Маунт Хопкинс (примерно 30 минут за ночь). В дальнейшем эти сделки были формализованы на уровне комитета по распределению времени этого телескопа. Таким образом, удалось организовать практически еженочные оценки блеска без необходимости лично присутствовать на телескопе.

После идентификации кандидата в сверхновую и спектрального подтверждения, что она является сверхновой типа Ia (что было довольно часто), через своих коллег Питера Гарнавича (Peter Garnavich) и Пита Чаллиса я связывался с наблюдателями на телескопе и договаривался о примерном времени и длительности экспозиции и фильтрах, а также снабжал их поисковой картой объекта. На следующий день я пересылал данные о проведенных наблюдениях и калибровках с компьютеров Маунт Хопкинс в Гарвард. Начиная с SN 1993as в октябре 1993 г. и по SN 1996bv в ноябре 1996 г. я собрал таким образом 22 хорошо откалиброванные кривые блеска сверхновых типа Ia, всего 1200 наблюдений. Через несколько лет после того, как было опубликовано 29 кривых блеска из цифрового обзора Калан/Тололо, мы опубликовали свои результаты, которые удвоили число хорошо измеренных ПЗС-кривых блеска сверхновых типа Ia. Эти две выборки кривых блеска сверхновых легли в основу нашего открытия ускоренного расширения Вселенной.

В конце лета вернулся Билл Пресс, и мы продолжили совместную работу по анализу небольшого числа хорошо измеренных кривых блеска сверхновых, используя метод Райбики (Rybcicki) и Пресса по разделению вкладов собственной яркости сверхновой и расстояния в наблюдаемый блеск в одной полосе (узком диапазоне длин волн). Достоинством этого метода, который мы назвали методом определения формы кривой блеска (Light Curve Shape, LCS), было то, что он позволял получить истинную эмпирическую модель, которая включала ковариацию данных и модели. LCS-методом можно было оценивать максимум яркости сверхновой по наблюдениям любого участка её кривой блеска с лучшей точностью, чем давали другие алгоритмы. Применив этот метод к первым десяти кривым блеска сверхновых из обзора Калан/Тололо, мы уменьшили разброс точек при измерении скорости расширения Вселенной вдвое. Таким образом, LCS-метод позволил уменьшить требуемое число сверхновых, необходимых для статистически точного измерения замедления расширения Вселенной, в 5,5 раз. Мне посчастливилось проверять этот метод на данных, полученных группой Серро-Тололо на южном небе, и мне хотелось бы ещё раз поблагодарить здесь группу обзора Калан/Тололо. Прочитав благодарности из статьи о LCS-методе, написанной вместе с Бобом и Биллом: "Мы признательны Марио Хамую, Марку Филиппу,

Нику Санцеффу и всем участникам коллаборации Калан/Тололо за возможность использовать их выдающиеся данные до публикации". В качестве взаимной любезности, несколькими годами позже мы с радостью предоставили до публикации данные о наших северных сверхновых для статьи, написанной Марком и другими сотрудниками группы Калан/Тололо.

Несмотря на повышение точности после применения LCS-метода, нам не хватало информации о важнейшем систематическом эффекте, затрудняющем аккуратное определение расстояний до сверхновых, который был связан с наличием пыли на луче зрения. Пыль в хозяйских галактиках ослабляет блеск сверхновых, что приводит к переоценке расстояний до них. Кроме того, из-за присутствия межзвёздной пыли цвет сверхновых становится краснее: размер пылинок таков, что они наиболее интенсивно рассеивают голубые лучи и в меньшей степени рассеивают красные (эффект межзвёздного покраснения). Когда предыдущие исследователи, такие как Алан Сендидж и Густав Тамман (Gustav Tammann), пытались учесть эффект покраснения на пыли, предполагая неизменным собственный цвет сверхновых, разброс в измерении расстояний только возрастал! Боб сказал мне тогда: "Это плохой признак, говорящий, что так не следует делать!"

В это время мне и пришла в голову новая идея, вероятно, моя первая собственная. Метод LCS можно было применить для отделения собственного цвета сверхновой (было известно, что собственный цвет более слабых сверхновых краснее) от внешнего покраснения, обусловленного межзвёздной пылью, используя фильтры для разных цветов. Новый метод определения формы многоцветной кривой блеска (Multicolor LCS, MLCS) позволял разделить вклады в видимый блеск сверхновых от собственной яркости, расстояния и поглощения межзвёздной пылью. Применив MLCS-метод к новым выборкам сверхновых, нам удалось измерить скорость расширения Вселенной с беспрецедентной точностью, уменьшив разброс точек после применения узкополосного LCS-метода на 50 % (см. рис. 2). Очень важно, что MLCS-метод позволил устранить межзвёздную пыль как опасный источник систематических ошибок. Различая внутренние и внешние изменения в цвете сверхновых, стало возможным использовать дополнительную информацию (известную в статистике как "байесовскую априорную вероятность", Bayesian prior) о свойствах пыли для дальнейшего увеличения точности измерения расстояний. Это оказалось особенно важным для нашего последующего нобелевского открытия: большая часть данных, полученных нами, имела низкое отношение сигнал/шум, в таких условиях подобный подход превосходно работает, поэтому мы использовали его во всех наших дальнейших измерениях расстояний до сверхновых.

Заметим мимоходом, что Роберт Дж. Трюмплер (Robert J. Trumpler) в 1930-х гг. первым отметил важность учёта пыли при определении расстояний до звёзд, так что мне было особенно приятно получить премию им. Трюмплера Тихоокеанского астрономического общества (PASP) 1999 г. за "диссертацию, особенно ценную для астрономических исследований".

Используя метод MLCS и значительно увеличенную выборку сверхновых на малых красных смещениях, нам удалось провести несколько дополнительных важных измерений, включая измерение движения галактик местной группы (Local Group) относительно глобальной системы отсчёта, связанной с реликтовым излучением, и измерение внутреннего покраснения в хозяйских галактиках сверхновых, а также доказать линейность локального расширения Вселенной.

3. Формирование группы по поиску сверхновых на больших красных смещениях (High-Z Team)

В начале марта 1994 г. я всё ещё был аспирантом и вместе с Бобом и Питом принимал участие в наблюдениях на многозеркальном телескопе (Multiple Mirror Telescope, MMT) обсерватории Маунт Хопкинс. Однажды, когда мы находились в комнате управления телескопом, нам позвонил Сол Перлмуттер из лаборатории им. Лоуренса в Беркли (Lawrence Berkeley Lab) и сообщил о возможной далёкой сверхновой, обнаруженной его группой. Мы немедленно сняли её спектр для группы из Беркли. Смещение спектра объекта в красную сторону из-за расширения Вселенной задаёт красное смещение z . Далее связь между красным смещением и расстоянием до источника используется для определения скорости расширения Вселенной. Сверхновые на больших красных смещениях позволяют измерить скорость расширения Вселенной в более ранние эпохи, поскольку свет от них был испущен в прошлом, когда Вселенная была моложе. Сравнивая скорость расширения на разных красных смещениях, можно определить, как она изменялась со временем. SN 1994G на $z = 0,425$, находящаяся на расстоянии 5×10^9 св. лет, была самой далёкой сверхновой типа Ia, известной в то время! Это пробудило у нас интерес найти ещё более удалённые объекты. Позже в том же году наш диссертационный совет попросил меня оценить число рекордно далёких сверхновых, которые нужно добавить к нашей выборке, чтобы методом MLCS измерить

скорость торможения расширения Вселенной. Мои оценки показали, что требуется два десятка таких объектов.

Примерно в то же время Брайан начал вести переговоры с Ником Санцеффом о создании собственной рабочей группы, которая могла бы конкурировать с группой Сола. Как рассуждал Брайан, объединение группы Калан/Тололо с гарвардской группой и включение в группу нескольких бывших сотрудников свело бы вместе экспертов по физике сверхновых и наблюдателей, имеющих надёжные данные по кривым блеска SN Ia на малых красных смещениях, и это позволило бы вырваться вперёд в гонке за результатами в наземных наблюдениях. Сформированную таким образом рабочую группу поиска сверхновых на больших красных смещениях (High-Z Team) возглавил Ник Санцефф, а с 1996 г. его руководил Брайан Шмидт. Группа быстро приобрела набор светофильтров для наблюдения сверхновых на больших красных смещениях. Брайан разработал программное обеспечение, значение которого для проекта трудно переоценить. С его помощью для открытия сверхновых из изображений можно было вычитать фоновую подсветку хозяйской галактики с учётом переменности качества изображения. Таким образом группа подключилась к гонке за результатами измерения скорости торможения расширения Вселенной и за предсказание будущего Вселенной.

К апрелю 1995 г. Брайан нашёл первую рекордно далёкую сверхновую на $z = 0,478$ и измерил её кривую блеска. Я применил метод MLCS для измерения расстояния до неё и сравнил результаты для различных значений параметра торможения. Я показал результат сотрудникам и они нервно засмеялись — эта сверхновая располагалась на графике в области, показывающей ускоренное расширение Вселенной. Успокаивало то, что ошибки измерений были достаточно большими и один объект не давал статистически надёжного результата.

Летом 1995 г. в Айгуаблаве (Aiguablava) в Испании состоялась конференция по сверхновым типа Ia, на которой присутствовали участники обеих групп (рис. 3). Группа Сола, которая называлась Проект космологических сверхновых (Supernova Cosmology Project, SCP), уже измерила семь сверхновых с большими красными смещениями и близко подошла к ответу. У нас были результаты только по одной сверхновой с большим красным смещением, но мы надеялись, что к следующему году мы догоним группу SCP.



Рис. 3. Вверху слева — группа по поиску сверхновых на больших z в Аспене (задний ряд, слева направо: Тонрай, Санцефф, Лейбундгут, Филиппенко, Хамуй; передний ряд: Джха, Рисс, Шмидт, Киршнер). Вверху справа — Рисс, Гольдхабер и Шмидт в Айгуаблаве. Внизу слева — Айгуаблава, участники обеих групп слева направо: Пенниакер, Филиппенко, Рисс, Шмидт, Нуджент, Санцефф. Внизу справа — группа по поиску сверхновых на больших z на наблюдениях на телескопе им. Кека, осень 1996 г., слева направо: Рисс и Филиппенко.

В 1996 г. во время шестого цикла наблюдений космического телескопа им. Хаббла директор Научного института космического телескопа (Space Telescope Science Institute) Роберт Уильямс (Robert Williams) выделил 28 орбит резервного директорского времени космического телескопа двум группам для последующих наблюдений сверхновых, открытых с Земли. Группа SCP была недовольна тем, что обеим группам предлагались равные условия, однако Уильямс полагал, что работа на космическом телескопе должна поддержать обе соревнующиеся группы, занятые изучением столь важной проблемы.

В то лето после защиты кандидатской диссертации я стал размышлять, насколько точно можно измерить замедление расширения, придерживаясь различных стратегий. Что лучше, трижды измерить, скажем, восемь сверхновых или шесть раз — четыре? Я провёл моделирование методом Монте-Карло (при этом компьютер повторил эксперимент тысячи раз) и получил, что точнее будет шестикратное измерение четырёх сверхновых, т.е. в решении этой проблемы важнее качество, а не количество. Той весной нам также очень повезло с наземными наблюдениями, и мы открыли восемь новых SN Ia вплоть до $z = 0,62$.

Получив степень доктора философии (PhD), я должен был найти место научного сотрудника с кандидатской степенью (post-doc position). К сожалению, у нашей группы по поиску сверхновых на больших красных смещениях не было средств для содержания такого места, поэтому я вынужден был податься на рынок труда. Я получил твёрдое предложение от группы SCP, о чём сообщил мне покойный Герсон Гольдхабер (Gerson Goldhaber), и я почти принял его. Но тут выяснилось, что я попал в лист ожидания на вакантную мной стипендию Миллера в Калифорнийском университете Беркли — должность, которая предоставляла небольшой исследовательский бюджет и полную автономию. В Беркли работал профессор Алекс Филиппенко (Alex Filippenko), известный эксперт по спектроскопии сверхновых и энтузиаст поддержки молодых учёных. Более того, он недавно перешёл из группы SCP в группу поиска сверхновых на больших красных смещениях, что позволило последней получить доступ к наблюдательному времени на телескопах им. Кека (Keck). Я был счастлив начать работать в Беркли с Алексом и продолжил работу в составе группы по поиску сверхновых на больших z . В Беркли мне очень запомнилась совместная работа с Алексом, энергичным и очень дотошным астрономом. Чуть позже в том же году группа SCP начала обсуждать результаты анализа первых семи далёких сверхновых. Их данные свидетельствовали о сильном замедлении расширения Вселенной, в которой было достаточно вещества для того, чтобы в будущем гравитация заставила Вселенную сжиматься. В 1996 г. эти результаты обсуждались в Принстоне на конференции, на которой присутствовал и Боб, и были опубликованы в 1997 г. [3]. Результат был близок к тому, что ожидали в то время, однако было ясно, что крайне нужны новые наблюдения.

К этому времени наша группа столкнулась с обычной академической управленческой проблемой — начальников было больше, чем исполнителей. Число участников группы выросло с 9 до 15 человек, включая Джона Тонря (John Tonry), Кристофера Стаббса (Christopher Stubbs), Питера Гарнавича (Peter Garnavich), Крега Хогана (Craig Hogan) и Питера Чаллиса (Peter Challis). И лишь немногие из нас находились в "расцвете" академической карьеры, на той энергичной промежуточной постдокской стадии, на которой учёный быстро осваивает предмет и ещё может выделять максимум времени для исследований. В астрофизических коллаборациях скорость работы ограничивается не скоростью ЦПУ компьютера или временем наблюдений на телескопе, а дефицитом людских ресурсов.

При анализе данных мы столкнулись с проблемами, частично из-за того, что нам требовалось слишком много времени для открытия и последующих наблюдений сверхновых, а частично потому, что в отличие от группы SCP, которая вся целиком находилась в Беркли, наша группа была рассеяна по всему миру и работать вместе было непросто. К началу 1997 г. мы уже начали отставать, получая новые данные и не успевая обрабатывать старые. Брайан предложил и группа поддержала такой план действий: пусть отдельные молодые участники группы имеют возможность и берут на себя ответственность по сбору всех имеющихся прошлых данных, их обработке и анализу, а также по написанию статей. В награду они становились лидерами исследований и первыми авторами публикаций. Тем самым молодые участники группы набирали бы академические очки, столь нужные им для дальнейшей работы. Чтобы начать процесс, в марте 1997 г. молодые участники группы (Брайан, я,

Питер Гарнавич, Пит Чаллис, Алехандро Клоккиатти (Alejandro Clocchiatti), Ал Деркс (Al Diercks) и Дэвид Райсс (David Reiss)) собрались в Сигтле по приглашению Криса Стаббса на рабочее совещание, которому было дано название "Reduce Fest" (праздник редукции наблюдений) и целью которого была разработка программного обеспечения для анализа изображений. После некоторых успехов в этом деле стало ясно, что опорные изображения были недостаточно хороши для надёжного вычитания фона хозяйской галактики и измерения блеска сверхновых. Брайан и я яростно защищали способ, которым следует измерять блеск сверхновых, когда статистика изображения определяется случайными флуктуациями фона ночного неба; оглядываясь назад, можно сказать, что такая статистика оказалась ключевым звеном всей работы. Мы много спорили с Брайаном о науке, но всегда аргументированно и с пользой для решения этой сложной проблемы. Когда Брайан переехал в Австралию, эти аргументы часами переосмысливались нами обоими и привели к большим счетам за телефонные разговоры, которые любезно оплачивал Алекс.

Наша группа стала опасаться, что отсутствие статьи с "первым результатом" от команды поиска сверхновых на больших красных смещениях, сравнимой с уже опубликованной статьёй группы SCP [3], могло бы ограничить наши возможности в соревновании за новое время на телескопах. Было ясно, что нам предстоит большая работа по анализу всех имеющихся у нас данных по сверхновым, но нам был понятен способ достижения прогресса в решении этой задачи. В 1997 г. мы воспользовались временем на космическом телескопе им. Хаббла для наблюдений ещё четырёх сверхновых на больших красных смещениях, высокое качество и однородность полученных в тех наблюдениях данных позволили нам провести их быструю обработку и анализ. Питер Гарнавич добровольно вызвался быть "разведчиком", чтобы сделать быстрый анализ этих наблюдений с космического телескопа и написать короткое сообщение о полученных результатах [4]. То, что увидели Питер и наша группа в ходе этой первой разведки удалённой Вселенной, было поистине удивительным. Мы увидели, что расширение Вселенной замедляется не так медленно, чтобы в будущем смениться сжатием.

Тем временем группа SCP изменила свои первоначальные выводы, основанные на анализе первых семи удалённых сверхновых [5]. Они добавили новую, самую далёкую сверхновую, которая благодаря их собственным наблюдениям с космического телескопа оказалась ещё и самой надёжно измеренной. Теперь обе группы были едины во мнении, что расширение Вселенной тормозится не так быстро, чтобы в будущем могло наступить сжатие. К концу 1997 г. и на совместной пресс-конференции в начале 1998 г. на съезде Американского астрономического общества (AAS) обе группы представили свои результаты и намекнули, что в дальнейшем будут новые результаты.

4. Ускоряющаяся Вселенная

Позднее в 1997 г. я возглавил работу по анализу всей совокупности данных, полученных нашей группой. Большая часть работы была чисто технической. После использования новых опорных изображений при вычитании света хозяйской галактики с помощью программ, написанных Брайаном, я измерил блеск шести наших сверхновых относительно звёзд поля. Участники "Reduce Fest" в Сигтле с усердием принялись за работу, перемеривая единственную сверхновую новым методом. Затем я откалибровал блеск опорных звёзд по трём ночам наблюдений относительно стандартных звёзд. Поскольку сверхновые наблюдались на разных ПЗС-матрицах и на разных телескопах, также следовало провести кросс-калибровку их матриц отклика по звёздам, которые наблюдались сквозь лёгкие облака. После короткой консультации с Ником Санцеффом стало ясно, что лёгкие облака достаточно серые⁵ для такой калибровки. Затем я принял решение совершенствовать свой MLCS-алгоритм. Мне нужно было включить в него новые кривые блеска сверхновых из моей диссертации и из обзора Калан/Тололо, а также сделать ещё несколько поправок. Эти поправки включали обнаруженную корреляцию второго порядка между формой кривой блеска и светимостью в максимуме, а также использование метода Монте-Карло для моделирования хода луча зрения сквозь хозяйскую галактику

⁵ То есть коэффициент поглощения света в них не зависит от длины волн. (Примеч. перев.)

для лучшего учёта эффектов покраснения на межзвёздной пыли. Последняя идея была выдвинута в работе [6]. Новая версия метода MLCS была включена в приложение к статье, над которой я работал [7].

Если вам случится оказаться в одной комнате с физиками и астрономами и вы захотите узнать, кто есть кто, спросите, знают ли они, как вычислить "K-поправку". И те, и другие сумеют это сделать, но только астрономы знают эту процедуру по имени. Необходимость этой поправки возникает при вычислении расстояния до сверхновой по её видимому блеску из-за расширения Вселенной. Кроме красного смещения, расширение Вселенной приводит к замедлению временных интервалов, в течение которых наблюдается объект, изменению интенсивности излучения на данной длине волны, а также к смещению спектра из наблюдаемой полосы длин волн. (Физики сказали бы о необходимости "релятивистских поправок".) Мы с Брайаном неоднократно обсуждали, как наиболее аккуратно применить эти поправки к сверхновым. Позднее я узнал от коллег из группы SCP, что, несмотря на проводимый ими тщательный анализ этих поправок, погрешности в вычислении поправок, по-видимому, ограничивали точность анализа первых семи сверхновых. K-поправки — непростое дело.

К осени я обработал все данные с помощью своего алгоритма MLCS и позднее вместе с Марком Филлипсом — с помощью его собственного метода, так что можно было сравнить результаты. Чтобы включить в анализ подложину сверхновых, которые были ранее исключены из-за неполноты кривых блеска, я использовал новый "метод короткого снимка" (Snapshot Method), разработанный совместно с Питером Нуджентом (Peter Nugent). В этом методе использовалась информация о спектре сверхновой, чтобы предсказать поведение её кривой блеска в широкополосных фильтрах. Мне очень хотелось проанализировать как можно больше имеющихся данных, так как мне стало известно от коллег из SCP (во время игры в американский футбол в грязных парках Беркли), что их группа уже набрала 40 сверхновых на больших красных смещениях.

Незначительное число сверхновых с большим красным смещением, имевшихся в то время у нас, компенсировалось следующими факторами. Во-первых, мы набирали большее количество сверхновых на малых красных смещениях (17 сверхновых из обзора Калан/Тололо, которые были в распоряжении обеих групп, и ещё 17 сверхновых из моей диссертации и из статьи о методе коротких снимков). Во-вторых, из-за используемой нами многоцветной фотометрии и байесовских априорных вероятностей разбор точек у наших сверхновых с большими красными смещениями был вдвое меньше, чем у конкурирующей группы. В целом, осенью 1997 г. в нашем космологическом исследовании сверхновых было сделано много новых важных дополнений, что серьёзно укрепило достоверность будущего открытия.

По измерениям расстояний до сверхновых я вычислял темп расширения Вселенной в прошлом и, сравнивая данные в различные моменты времени, мог оценивать темп изменения скорости расширения Вселенной за последние несколько миллиардов лет. Зная, как тормозилось расширение (через так называемый параметр торможения q_0), можно было оценить плотность вещества во Вселенной (так называемый параметр омега вещества, Ω_M). Чем больше во Вселенной вещества, тем сильнее его гравитационное притяжение тормозит расширение. Связь между этими двумя параметрами весьма проста: $q_0 = \Omega_M/2$. Но то, что я сначала измерил и записал в своей лабораторной тетради осенью 1997 г., было поистине удивительным! Единственный способ описать полученные мной изменения скорости расширения Вселенной — допустить, что масса вещества может быть "отрицательной". Другими словами, несмотря на уравнения, Вселенная вовсе не тормозилась, а, наоборот, расширялась с ускорением (рис. 4, левая часть)!

Это простое уравнение предполагает, что вещество является единственным видом материи во Вселенной. Поэтому сначала я не рассматривал никаких других сил, кроме гравитационного притяжения обычного вещества, но результаты моих компьютерных расчётов показывали, что только отрицательная масса может описать наблюдаемое ускоренное расширение. Более сложное выражение для параметра q_0 , известное в общей теории относительности: $q_0 = \Omega_M/2 - \Omega_\Lambda$, предполагает наличие Ω_Λ , т.е. плотности энергии пустого пространства. Эйнштейн назвал Λ -компоненту космологической постоянной; в некотором смысле она действует как антигравитация. Современные специалисты по физике частиц назвали бы её плотностью энергии вакуума, т.е. "суммой нулевой энергии всех

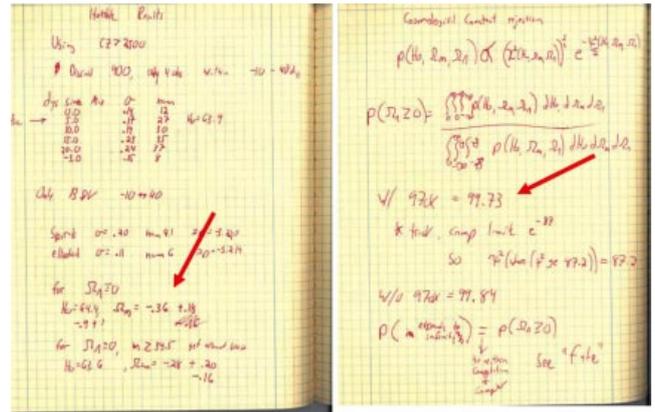


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Тетрадь автора. Слева — после различных проверок данных я решил проанализировать скорость расширения в терминах плотности массы вещества во Вселенной. Полученный ответ, $-0,36 \pm 0,18$, имел бы смысл, если бы Вселенная расширялась с ускорением! Справа — через несколько дней я вывел значение отличной от нуля космологической постоянной на уровне $99,7-99,8\%$, независимо от плотности массы. Если плотность массы взята на минимально допустимом уровне $\sim 0,2$, то уровень значимости ненулевой космологической постоянной остаётся (4–5) σ .

частиц в вакууме", но после такого вычисления пожаловались бы на неправдоподобно огромное значение полученного числа.

Поскольку в природе нет отрицательных масс, в замешательстве и разочаровании (в том же духе, что и Эйнштейн, который ввёл её в свои уравнения много лет назад) я подставил знаменитую космологическую константу в уравнения и немедленно получил, что её антигравитация способна объяснить выведенное мною ускоренное расширение (см. рис. 4, правая часть). Величина космологической постоянной была значимой как в статистическом, так и в абсолютном смысле — оказывалось, что Вселенная должна быть заполнена одной только этой постоянной на 70%! Это был замечательный факт, и даже мой скромный опыт подсказывал, что подобные "открытия" обычно являются результатом ошибок. Поэтому я потратил пару недель, перепроверяя вычисления, но не нашёл ошибок. Тогда я начал мучительно думать о возможных астрофизических источниках, влияющих на наблюдения. Здесь помогла моя диссертация о распознавании и учёте эффектов поглощения на межзвёздной пыли. Пыль в удалённых галактиках могла бы уменьшать видимый блеск далёких сверхновых и тем самым маскировать эффект ускоренного расширения, но применение моего MLCS-алгоритма и независимо алгоритма Марка Филлипса по исправлению эффектов межзвёздного покраснения делало эту гипотезу маловероятной. Всё более укрепляясь в справедливости своих результатов, я сперва показал их Брайану, который перепроверил окончательные вычисления. В начале января 1998 г. он написал мне, что пришёл к такому же ответу. Позднее средства массовой информации цитировали его так: "Моя собственная реакция была чем-то между удивлением и ужасом".

Мне также удалось устранить некоторые другие сомнения. Одно из них состояло в том, что сверхновые на больших красных смещениях, появившиеся тогда, когда Вселенная была моложе, могли отличаться от сверхновых в наше время. Однако сравнение расстояний от близких сверхновых в старых (эллиптических) и молодых (спиральных) галактиках ограничивало возможную величину разницы менее чем на треть от сигнала, вызывающего эффект ускорения. Более того, мой алгоритм MLCS и алгоритм Марка Филлипса приводили к одному и тому же результату: кривые блеска и спектры близких и далёких сверхновых были неразличимы. Другая проблема состояла в том, что размер пылинок в удалённых хозяйских галактиках необычно большой, поэтому они приводят не к покраснению, а только к ослаблению света, и эффект такой (серой) пыли невозможно отделить. Я провёл вычисления и убедился, что если такая пыль и существует, то её количество в хозяйских галактиках должно быть ничтожным. Третья проблема состояла в хорошо известном в астрономии эффекте Мальмквиста: в ограниченной выборке преимущественно наблюдаются ярчайшие объекты. Брайан

проанализировал этот эффект и показал, что он также не играет роли. Мы даже исследовали возможные маловероятные ситуации — например, локальный воид во Вселенной, засорение выборки другими типами сверхновых, эффекты гравитационного линзирования, — и пришли к выводу, что все они несущественны.

Так совпало, что в моей жизни произошло ещё одно знаменательное событие. Нэнси Джой Шондорф (Nancy Joy Schondorf) и я поженились 10 января 1998 г., в лучший день в моей жизни. Мы планировали провести медовый месяц на Гавайях после очередных наблюдений сверхновых на Большом острове (о. Гавайи).

Тем временем другие участники нашей группы проводили собственные проверки и также не обнаружили никаких ошибок. Оглядываясь назад, забавно смотреть на эмоции, выражавшиеся по поводу полученного результата в электронных сообщениях, которыми мы обменивались в течение нескольких январских дней 1998 г.

А. Филиппенко, Беркли, Калифорния, 10.01.1998, 10:11: "*Перед своей свадьбой Адам показал мне фантастические графики. Наши данные свидетельствуют о ненулевой космологической постоянной! Кто знает? Может быть, это и так!*"

Б. Лейбундгут, Гаршинг, Германия, 11.01.1998, 4:19: "*Касательно космологической постоянной я бы хотел спросить Адама или кого-нибудь ещё из группы, достаточно ли готовы они отстаивать полученный результат. Нет смысла писать статью, если мы не уверены в правильности ответа!*"

Б. Шмидт, Австралия, 11.01.1998, 19:33: "*Новые SN действительно свидетельствуют об отличной от нуля космологической постоянной ... , насколько мы уверены в этом? Меня это крайне удивляет...*"

М. Филлипс, Чили, 12.01.1998, 04:56: "*Как серьёзные и ответственные учёные (ха!) мы все понимаем, что ЕЩЁ СЛИШКОМ РАНО делать надёжные выводы о значении космологической постоянной ...!*"

Р. Киршнер, Санта Барбара, Калифорния 11.01.1998, 10:18: "*Я обеспокоен. Сердцем мы понимаем, что космологическая постоянная ошибочна, а голова говорит, что это неважно, и мы просто сообщаем результаты наблюдений ... Глупо было бы сказать, что "мы ДОЛЖНЫ предположить ненулевую космологическую постоянную" только для того, чтобы откреститься от неё на следующий год.*"

Дж. Тонрай, Гавайи, 12.01.1998, 11:40: "*...кто помнит об открытии магнитных монополей и прочих заблуждениях? ... с другой стороны, нам не надо бояться и выдать результат с соответствующими оговорками...*"

А. Филиппенко, 12.01.1998, 12:02: "*Если мы ошибаемся в конечном результате, пусть будет так. Но по крайней мере мы участвуем в гонке!*"

А. Рисс, Беркли, Калифорния, 12.01.1998, 18:36 (послано вечером медового месяца под понимающе ледяным взглядом моей жены!): "*Результаты очень удивительные, даже шокирующие. Я старался никому о них не сообщать, потому что хотел сделать кое-какие проверки и написать о результатах прежде, чем другая группа пронохает о них ... Данные требуют ненулевую космологическую постоянную! Взгляните на эти результаты не сердцем или головой, а просто своими глазами. В конце концов, мы все здесь наблюдатели!*"

А. Клоккиатти, Чили, 13.01.1998, 7:30: "*Если Эйнштейн ошибался с космологической постоянной ... , почему нам нельзя?*"

Н. Санцефф, Чили, 13.01.1998, 13:47: "*Я решительно советую тебе (Адам) вкалывать как проклятый для окончательного разрешения этого вопроса. Все правы. Нам надо быть осторожными и опубликовать надёжные данные с подробным обсуждением, чтобы мы и сами в них поверили... Если ты и вправду уверен, что космологическая постоянная отлична от нуля — бог мой, да пусть! Возьми на себя ответственность, как организатор и главный воруны. Я серьёзно — может быть, у тебя никогда в жизни больше не будет такого волнующего результата!*"

Ник был абсолютно прав.

20 февраля мы устроили телеконференцию для решения вопроса, надо ли поторопиться со статьёй, которую я в то время писал, и черновик которой был разослан участникам группы. Мы решили действовать. Каким-то образом (мне до сих пор неясно, каким) Джим Гланц (Jim Glanz) из журнала *Science* пронюхал о нашем результате, взял интервью со многими из нас, и выложил этот материал. Алекс Филиппенко от имени нашей группы доложил результаты на конференции по тёмной материи в Университете Калифорнии в Лос-Анджелесе параллельно с докладом группы SCP. Обе группы теперь утверждали, что их данные показывают ускоренное расширение Вселенной. Долгими ночами при помощи

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 116: 1009–1038, 1998 September
© 1998 The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

OBSERVATIONAL EVIDENCE FROM SUPERNOVAE FOR AN ACCELERATING UNIVERSE AND A COSMOLOGICAL CONSTANT

ADAM G. RISS,¹ ALEXIS V. FILIPPENKO,¹ PETER CHALLIS,² ALEJANDRO CLOCCIATTI,³ ALAN DIECKES,⁴ PETER M. GARNAVICK,² RON L. GILLILAND,² CRAIG J. HOGAN,² SAURABHI JHA,² ROBERT P. KIRSHNER,² B. LEIBUNDGUT,⁶ M. M. PHILLIPS,⁷ DAVID REISS,⁸ BRIAN P. SCHMIDT,^{3,9} ROBERT A. SCHOMMER,¹ R. CHRIS SMITH,^{1,10} J. SPYROMILOU,⁶ CHRISTOPHER STUBBS,⁴ NICHOLAS B. SUNTZEFF,⁷ AND JOHN TONRY¹¹
Received 1998 March 13; revised 1998 May 6

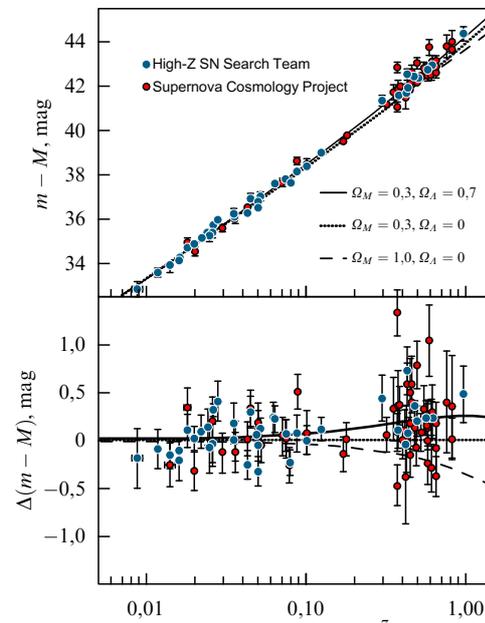


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Статья [7] группы по поиску сверхновых на больших z с открытием ускоренного расширения и хаббловские диаграммы, на которые нанесены сверхновые, измеренные обеими группами.

всех участников группы я заканчивал написание статьи. 13 марта я послал в печать статью: "Наблюдения сверхновых свидетельствуют об ускоренном расширении Вселенной и космологической постоянной" (см. верхнюю часть рис. 5). Она была принята к печати 6 мая [7]. Спустя 9 месяцев группа SCP опубликовала свои результаты [8]. В 1998 г. вывод, полученный двумя независимыми группами, стал "прорывом года"⁶ по версии журнала *Science* (см. нижнюю часть рис. 5).

5. Экстраординарные утверждения требуют экстраординарных доказательств

Наше открытие, что Вселенная в настоящее время расширяется с ускорением, немедленно привело к фундаментальным выводам. В энергетическом балансе Вселенной доминирует распределённая повсюду "тёмная энергия". Тёмная энергия — это новая составляющая Вселенной с отрицательным давлением, она приводит к тому, что её антигравитационное отталкивание доминирует над гравитационным притяжением обычного вещества. Космологическая постоянная является воплощением тёмной энергии, родословная которой восходит к Эйнштейну. Было ли космическое ускорение, вызванное тёмной энергией, верной интерпретацией данных по сверхновым или этот вывод был ошибочен? Попытки в прошлом использовать удалённые источники (такие как ярчайшие скопления галактик) для измерения изменения скорости расширения были неудачными из-за собственной эволюции светимости источников. Поэтому требовалось хорошенько проверить космическое ускорение. Как часто говорят учёные, экстраординарные утверждения требуют экстраординарных доказательств.

Ситуация того времени хорошо описана в популярной книжке Дональда Голдсмита "Вселенную разносит"⁷, опубликованной в

⁶ В английском оригинале "Breakthrough of the Year". (Примеч. ред.)

⁷ Donald Goldsmith "The Runaway Universe".

2000 г. Суть наших наблюдений удалённых сверхновых была в том, что они выглядели на 20 % слабее, чем ожидалось. Сделав обычное предположение о том, что "более тусклый означает более далёкий", мы пришли к нашим выводам об ускорении Вселенной и наличии тёмной энергии. В 1999 г. Энтони Агирре (Anthony Aguirre) из Гарвардского Смитсоновского астрофизического центра (CfA) опубликовал серию статей, в которых указал на возможную маскировку эффекта ускорения Вселенной по сверхновым поглощением света на серой пыли — этакой мифической субстанции наподобие Лох-Несского чудовища или снежного человека в астрономии. Его идея состояла в том, что вдобавок к обычным межзвёздным пылинкам, приводящим к покраснению и ослаблению света, межгалактическое пространство заполнено пылинками-"иголками" длиной в одну десятую миллиметра и вдесятеро меньшей толщиной. Агирре строго вычислил, что такие иголки могли бы одинаково поглощать свет на разных длинах волн, т.е. выглядеть "серыми". Серую пыль практически невозможно обнаружить. Такая возможность выглядела довольно экзотической, но ведь столь же необычной была и тёмная энергия! Агирре показал, что никакие астрономические наблюдения того времени не могли исключить наличие такой пыли между галактиками в количестве, достаточном для мимикрии эффекта ускоренного расширения Вселенной из-за присутствия тёмной энергии. При выборе между двумя невероятными возможностями принцип бритвы Оккама мог бы стать веским аргументом.

К счастью, вскоре нашёлся хороший тест для проверки конкурирующей гипотезы. Если удалённые сверхновые казались слабее не из-за ускоренного расширения Вселенной, а по какой-либо астрофизической причине (например, из-за экранирования серой пылью или потому, что в прошлом сверхновые были другими), то дополнительное ослабление далёких сверхновых должно было постоянно увеличиваться с увеличением расстояния до объекта. Иными словами, от источника, расположенного вдвое дальше, эффект ослабления должен быть вдвое больше. Если же, напротив, тёмная энергия стала причиной ускоренного расширения относительно недавно, то более далёкие сверхновые должны были указывать на скорость расширения в эпоху, когда тёмная энергия ещё не доминировала над веществом. В ту эпоху гравитация вещества должна была тормозить расширение Вселенной, и именно тогда происходило формирование галактик и скоплений галактик. Если ускоренное расширение уменьшает яркость источника и увеличивает расстояние до него, торможение расширения приводит к противоположным эффектам — укорачивает расстояния и делает источники ярче. Совокупный эффект от двух фаз расширения (с замедлением и с последующим ускорением), по-видимому, должен был выглядеть иначе, чем поглощение серой пылью или собственная эволюция объектов при наблюдении сверхновых на красных смещениях, больших единицы. Голдсмит в 2000 г. писал: "Серая пыль и систематические эффекты могут выглядеть как эффект ненулевой космологической постоянной с большой точностью лишь до тех пор, пока сверхновые изучаются в относительно ограниченном объёме пространства... Если, однако, астрономы будут наблюдать сверхновые из гораздо большего объёма..., то космологические модели позволят отделить все остальные эффекты от ключевого: ускоренного расширения из-за ненулевой космологической постоянной... астрономы, стало быть, не должны спокойно восседать на имеющихся сверхновых... они должны наблюдать всё более далёкие объекты. Только тогда они смогут доказать, что серая пыль их не дурачит и ускоренно разлетающаяся Вселенная заслуживает всеобщего признания".

Это был призыв к оружию, который мы уже приняли!

К сожалению, искать сверхновые на таких расстояниях трудно, так как они становятся очень слабыми — как лампочка 60 Ватт с расстояния 400000 миль, вдвое большего, чем расстояние до Луны. Пять лет усилий обеих групп продемонстрировали, что столь слабые сверхновые слишком сложно надёжно обнаружить наземными телескопами: до сих пор каждая группа открыла по одной сверхновой на $z = 1,2$ (SCP — в 1998 г., группа по поиску сверхновых на больших z — в 1999 г.). Космический телескоп им. Хаббла мог наблюдать объекты с гораздо больших расстояний, чем любой наземный телескоп, но узкое поле зрения его основной камеры WFPC2 (широкоугольной планетной камеры 2) было крайне малό для попыток открыть далёкую сверхновую, если только по каким-то причинам сверхновые не вспыхивали в ранней Вселенной существенно чаще. В 1997 г. участники группы по поиску сверхновых на больших z Рон Джиллиленд (Ron Gilliland) и Марк Филлипс провели

разведку Вселенной на больших красных смещениях, повторно проведя наблюдение глубокого поля Хаббла камерой WFPC2 спустя два года после первого наблюдения. Они открыли две сверхновые, одна из которых, SN 1997ff, казалась сверхновой типа Ia, так как находилась в старой эллиптической галактике. Единичное наблюдение одной только этой сверхновой, хотя и было интересно само по себе, не позволяло измерить её кривую блеска или цвет, чтобы сделать оценку расстояния до неё, поэтому не могло служить тестом для проверки гипотезы серой пыли или эволюционного ослабления света. Однако в 2001 г. после моего переезда в Научный институт космического телескопа (STScI) я стал искать дополнительные наблюдения SN 1997ff и мне невероятно повезло!

Главный исследователь (PI) первой инфракрасной камеры на хаббловском телескопе (NICMOS) Роджер Томпсон (Rodger Thompson) использовал эту камеру для наблюдений в области глубокого поля Хаббла. По невероятно счастливой случайности SN 1997ff наблюдалась пару недель спустя после её открытия в самом углу поля зрения камеры NICMOS. В действительности она была так близка к краю, что то исчезала, то вновь появлялась в поле зрения из-за преднамеренного сдвига центра поля зрения (эта техника применяется для размазывания изображения по большему числу пикселей). У меня ушло несколько месяцев на то, чтобы из этих данных извлечь кривые блеска и цвета этой сверхновой, которые требовались для определения расстояния до неё и красного смещения. Оказалось, что SN 1997ff действительно является сверхновой типа Ia на красном смещении $z = 1,7$ — рекордно далёкой из когда-либо наблюдавшихся! Что более важно, она была примерно на 60 % ярче, чем ожидалось бы в предположении поглощения света серой пылью или систематического эволюционного ослабления света. Это было хорошим признаком того, что Вселенная в прошлом расширялась с замедлением и что сверхновые действительно могут служить надёжным индикатором истории расширения Вселенной.

Однако нам не хотелось основывать столь важное заключение только на одной случайно обнаруженной сверхновой. Нам очень хотелось найти больше. Возможность предоставилась в 2001 г., когда на телескопе им. Хаббла должны были установить новую камеру — усовершенствованную камеру для обзоров (Advanced Camera for Surveys, ACS), разработанную Холландом Фордом (Holland Ford) из Университета Джона Хопкинса. ACS увеличивала "область открытий" космического телескопа (произведение поля зрения на глубину детектирования) на порядок величины. В 2001 г. я подал заявку на использование ACS для нахождения и измерения подложки сверхновых типа Ia на красных смещениях $z > 1$, "сидя на плечах" обзора далёких галактик GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey) под руководством Мауро Дживалиско (Mauro Giavalisco). Идея была в том, что поле обзора GOODS, покрываемое 15-ю наведениями ACS, должно было наблюдаться каждые 45 дней. Наша новая группа, получившая название группы поиска сверхновых на сверхбольших z (включая Тонрая, Филиппенко, Киришнера, Лейбундугта, Чаллиса и Джжа (Jha) из старой группы и новых участников Казертано (Casertano), Стролджера (Strolger), Фергюсона (Ferguson), Дживалиско (Giavalisco), Мобашера (Mobasher) и Дикинсона (Dickinson)), вычитала бы эти изображения для поиска новых объектов. В отличие от прежних обзоров, проводившихся наземными телескопами, измерения в обзоре GOODS уже давали информацию о типе и цветах сверхновых. При открытии сверхновой Ia на $z > 1$ мы могли прервать плановые наблюдения на телескопе им. Хаббла и пронаблюдать её камерами ACS и NICMOS. Нашу заявку приняли, но это не гарантировало выполнение нашего плана. Экипаж космического шаттла НАСА (NASA) STS 109 сначала должен был установить эту камеру! Одной из величайших привилегий, оказанной мне как учёному, было объяснить астронавтам шаттла научную задачу проекта. Эти люди (Джон Грансфилд (John Grunsfeld), Майк Массимино (Mike Massimino), Скотт Альтман (Scott Altman), Джим Ньюман (Jim Newman), Дуан Кэрей (Duane Carey), Нэнси Карри (Nancy Curry) и Ричард Линнехан (Richard Linnehan)) были настоящими героями, которые рисковали своей жизнью для переоборудования космического телескопа им. Хаббла. Их успешная миссия в марте 2002 г. вновь вернула космический телескоп на пик своих возможностей и позволила нам провести задуманное исследование.

По сравнению с наземными наблюдениями использование космического телескопа для поиска и наблюдения сверхновых имело свои преимущества и недостатки. К плюсам относится отсутствие плохой погоды в космосе, резкие изображения, не искажённые

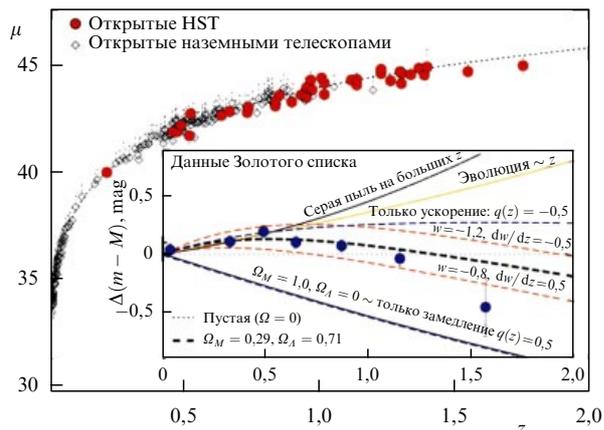


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Сверхновые, открытые с помощью телескопа им. Хаббла на $z > 1$, подтверждают полученный ранее результат. Наблюдая переход от ускорения к замедлению расширения (смотря назад во времени), группа по поиску сверхновых на больших z сумела исключить альтернативные астрофизические гипотезы (поглощение пылью или собственная эволюция источников) видимого по сверхновому ускоренному расширению Вселенной в модели со скрытой массой и тёмной энергией.

турбулентностью в атмосфере, и отсутствие засветки луной. К минусам следует отнести отсутствие защиты детекторов земной атмосферой и магнитным полем от бомбардировки частицами космических лучей, которая на орбите в 100 раз интенсивнее, чем на поверхности Земли. Частица космических лучей оставляет на детекторе след, похожий на новый источник, которого не было на предыдущем снимке, и его можно спутать со сверхновой. Поскольку космические лучи попадают только в 2% пикселей на снимке с телескопа им. Хаббла и вероятность попасть в то же место изображения другой частицей ничтожна, астрономы легко отличают реальный источник от следа частицы космических лучей, сделав повторный снимок той же области. Однако, так как сверхновая могла появиться в одном из 16×10^6 пикселей поля зрения камеры ACS, чтобы исключить флуктуацию или даже три последовательных попадания частицы космических лучей в один пиксель, нам требовалось четыре последовательных снимка. Другая трудность возникла из-за способа управления телескопом им. Хаббла: наблюдательные программы загружаются в его компьютер раз в неделю. Мы могли изменить программу наблюдений только до полудня вторника до её загрузки в бортовой компьютер. Было бы иронией судьбы, если бы фотону, который летел от сверхновой 9×10^9 лет, требовалось попасть в телескоп им. Хаббла к полудню вторника, чтобы передать нам информацию! Мы сочли, что поиск сверхновых по выходным естественным образом удовлетворяет этому требованию.

Наша годичная программа 2002–2003 гг. по наблюдению далёких сверхновых на космическом телескопе оказалась полностью успешной. Мы открыли шесть сверхновых типа Ia с красными смещениями выше 1,25. С их помощью нам удалось отвергнуть гипотезы серой пыли и эволюции источников и надёжно установить, что Вселенная расширялась с замедлением, прежде чем начала расширяться с ускорением [9] (рис. 6). В физике изменение значения или знака торможения (как следствие изменения силы) обусловлено резким толчком⁸. Поэтому, когда в 2003 г. мы доложили этот результат на конференции, смена замедленного расширения Вселенной в прошлом на современное ускоренное расширение была названа свидетельством недавнего "космического толчка". Во время обсуждения полученных результатов я увидел в первом ряду корреспондента *Нью-Йорк Таймс* Денниса Овербая (Dennis Overbye) и попросил его не помещать мою фотографию на первой полосе под заголовком "Открытие космического толчка"⁹ — я не такой.

⁸ В английском оригинале — jerk. (Примеч. перев.)

⁹ Здесь игра слов: jerk на сленге означает наивный, непоседливый, глупый человек. (Примеч. перев.)

В течение следующих двух лет мы продолжали наблюдения сверхновых с красным смещением $z > 1$ на космическом телескопе и к 2007 г. их число возросло до 27. Эти данные не только подтвердили, что сверхновые отлично отслеживают историю расширения Вселенной, но и показали, что их можно было использовать для ответа на вопрос, как менялись свойства тёмной энергии на протяжении последних 10 миллиардов лет. До сих пор нет надёжных указаний, что они вообще изменялись, и это соответствует эйнштейновской космологической постоянной. Но здесь уместно процитировать слова Эдвина Хаббла из книги "Царство туманностей"¹⁰:

"С ростом расстояний наше знание уменьшается, и уменьшается быстро. В конце концов мы достигаем границы — предела чувствительности наших телескопов. Там мы измеряем тени и ищем среди призрачных ошибок измерений следы едва заметного сигнала. Но поиски будут продолжаться. И пока эмпирические ресурсы не исчерпаны, мы не обратимся к фантастическому царству спекуляций".

Хотя Хаббл не знал об ускоренном расширении Вселенной, его слова отлично подходят к нашей работе. Сегодня мы стараемся узнать больше о причинах космического ускорения, проводя новые более точные космологические эксперименты. Многим кажется, что этот вызов является величайшим для космологии и фундаментальной физики, и я с этим согласен. Начиная с 2003 г. данные со спутника WMAP, результаты измерения барийных акустических колебаний (Baryon Acoustic Oscillations, BAO), результаты изучения свойств крупномасштабной структуры Вселенной, эффекты слабого гравитационного линзирования и интегральный эффект Сакса–Вольфа независимо от сверхновых подтверждают современное ускоренное расширение Вселенной. Одно только измерение BAO надёжно свидетельствует о космическом ускорении. В своей работе я сконцентрировался на улучшении точности определения современной скорости расширения, также известной как постоянная Хаббла, поскольку знание её величины с процентной точностью значительно помогло бы в современных исследованиях. Уже сейчас мы увеличили точность определения постоянной Хаббла в 3 раза, до 3,5%. Это значение и данные измерений космического реликтового микроволнового излучения спутником WMAP достаточны для изучения свойств тёмной энергии, а также сверхновых на больших красных смещениях с точностью порядка 10% и дают независимую проверку нашим первым результатам. Ставится амбициозная задача достичь точности 1%. Я не надеюсь получить вторую Нобелевскую премию за эту новую работу, но пока мне рано об этом даже беспокоиться.

В заключение я хочу выразить глубокую благодарность удивительным людям, с которыми мне выпала честь работать, а также благодарность за предоставленные возможности. Я был счастлив разделить свой научный путь с моими коллегами из групп по поиску сверхновых на больших и сверхбольших красных смещениях. Я благодарю тех, кто строил и работал на телескопах ST10, которые позволили нам открыть первые далёкие сверхновые (Бернштейн и Тайсон), а также команду обзора Калан/Тололо за первые надёжные данные и дальнейшие исследования. Я благодарен всем тем, кто помог сделать космический телескоп им. Хаббла лучшим научным инструментом нашего времени, а также астрономам, которые рисковали своими жизнями для его поддержки. Более всего я благодарен своей семье, жене Нэнси и детям, за поддержку здорового духа и напоминание, что мир на Земле не менее интересен, чем окружающая нас Вселенная.

Перевёл с английского К.А. Постнов

Список литературы

1. Rybicki G B, Press W H *Astrophys. J.* **398** 169 (1992)
2. Phillips M M *Astrophys. J.* **413** L105 (1993)
3. Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **483** 565 (1997)
4. Garnavich P M et al. *Astrophys. J.* **493** L53 (1998)
5. Perlmutter S et al. *Nature* **392** 311 (1998)
6. Hatano K, Branch D, Deaton J *Astrophys. J.* **502** 177 (1998)
7. Riess A G et al. *Astron. J.* **116** 1009 (1998)
8. Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
9. Riess A G et al. *Astrophys. J.* **607** 665 (2004)

¹⁰ Edwin Hubble "The Realm of the Nebulae".