

МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ПОСТОЯНСТВО ПОСТОЯННЫХ

Курсовая работа
студента 2 курса
Соколова Антона Владимировича

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

Москва
2015

Содержание

1 Введение	3
2 Сверхновые типа Ia	4
3 Экспериментальные данные	6
4 Построение стандартных кривых блеска	7
5 Фитирование	9
6 Константа распада ^{56}Ni	10
7 Результаты	13
8 Заключение	15
Список литературы	16
Приложение	19

Аннотация

Работа посвящена ограничению относительной пространственно-временной вариации константы Ферми из различных форм кривых блеска сверхновых типа Ia. Изучение возможного пространственно-временного изменения констант является важной задачей для понимания фундаментальных законов физики. В данной работе с помощью кривых блеска сверхновых типа Ia, взятых из архивов наблюдательных данных SNLS, SDSS и SCP, было наложено ограничение на изменение постоянной распада ^{56}Ni и на относительную вариацию константы Ферми четырёхфермионного взаимодействия.

1 Введение

Существующие на данный момент фундаментальные физические теории, а именно Стандартная модель и общая теория относительности, неполны. Это явно следует из экспериментов, обнаруживших осцилляции нейтрино, а также из широкого круга астрономических наблюдений, свидетельствующих об ускоренном расширении видимой части Вселенной и о проблеме тёмной материи, связанной то ли с существованием неизвестного типа массивных частиц, не взаимодействующих с электромагнитным полем, то ли с неполнотой теории гравитации Эйнштейна. Кроме этого, не решённой окончательно задачей является объединение Стандартной модели и теории гравитации в одну непротиворечивую модель.

С момента появления и осознания всех вышеперечисленных проблем было создано большое число более или менее удачных физических моделей, призванных разрешить существующие противоречия. Одним из требований, предъявляемых к этим моделям, является соответствие их в некоторых предельных случаях уже известным, хорошо проверенным физическим законам. В свою очередь, это требование наводит на мысль о том, что в известных законах природы просто не учтены некоторые дополнительные зависимости, крайне слабо проявляющиеся на масштабах, с которыми имеют дело современные лаборатории. Иными словами, кажется вполне возможным, что константы, входящие в тот или иной закон, вовсе не являются постоянными величинами, а представляют собой скрытые на привычных масштабах

функции энергии или точки пространства-времени.

Возможные отклонения от известных законов физики при высоких энергиях в данный момент активно исследуются на коллайдерах. Однако не менее интересное поле для исследований представляют собой различные астрономические объекты, которые, благодаря развившейся в последние десятилетия технике астрофизических измерений, предоставляют хорошую возможность определения пространственно-временной вариации тех или иных физических моделей и, соответственно, констант, являющихся ключевыми параметрами этих моделей. Так, используемые в данной работе сверхновые имеют красные смещения $0 < z \lesssim 1$, то есть охватывают диапазон расстояний в миллиарды световых лет, и позволяют оценить возможные различия физических законов для очень далёких в пространственно-временном отношении объектов.

2 Сверхновые типа Ia

Взрыв сверхновой — природное явление, происходящее на финальной стадии эволюции некоторых звёзд и сопровождающееся большим выделением энергии ($E \sim 10^{46}$ Дж). Все сверхновые звёзды разделяют на два типа (I и II) по отсутствию (I) или наличию (II) в их спектре линий водорода, а сверхновые первого типа делят ещё на три класса (Ia, Ib, Ic) по наличию в их спектре линий гелия (b) и кремния (a). Так, изучаемые в данной работе сверхновые относятся к классу Ia и отличаются ярко выраженной линией поглощения ионизированного кремния (6150 \AA).

Помимо особенностей своего химического состава сверхновые типа Ia обладают ещё одним замечательным свойством: внутри своего класса они очень слабо отличаются друг от друга. Такой вывод можно сделать, рассматривая кривые блеска различных сверхновых типа Ia (кривая блеска — зависимость фиксируемой на Земле интенсивности электромагнитного излучения сверхновой от времени). Дело в том, что эти кривые можно простым растяжением по оси времени и настройкой интенсивности в максимуме привести к общему виду — некоторой шаблонной кривой. Данное свойство сверхновых типа Ia позволяет использовать их в качестве стандартных свеч: их абсолютные звёздные величины одинаковы с точностью до поправок,

которые можно учесть, зная отклонение кривой блеска конкретной сверхновой от стандартной:

$$\Delta m = 0.6 \cdot (s - 1), \quad (1)$$

где Δm — поправка к абсолютной звёздной величине в точке максимума кривой, s — stretch-factor (параметр растяжения кривой по оси времени). Зная данную поправку для каждой сверхновой, можно определить различие её видимой и абсолютной звёздных величин в максимуме блеска. Здесь также учитывают так называемую K-коррекцию: кривые блеска сверхновых на разных длинах волн отличаются, и для каждой длины волны нужно взять свою шаблонную кривую. Исходя из разности абсолютной и видимой звёздных величин определяется так называемое фотометрическое расстояние до сверхновой (расстояние до звезды в допущении, что метрика пространства псевдоевклидова). Это расстояние зависит от красного смещения z , определяемого независимо по смещению спектральных линий родительской галактики сверхновой, а также от космологических параметров Ω_M и Ω_Λ , соответствующих плотности энергии нерелятивистского вещества и тёмной энергии. В результате измерения большого числа кривых блеска сверхновых типа Ia эти параметры были определены и оказалось, что Вселенная расширяется с ускорением. В свою очередь, этот неожиданный результат повлёк за собой новые исследования сверхновых типа Ia, благодаря чему появились большие базы данных их кривых блеска, которые, в частности, используются в данной работе.

Физическая причина хорошей стандартизуемости кривых блеска сверхновых типа Ia является до сих пор предметом дискуссий. Наиболее обоснованная точка зрения заключается в том, что сверхновые типа Ia — бывшие белые карлики, находившиеся в двойных звёздных системах. По мере вращения вокруг общего центра масс в такой системе возможна аккреция вещества звезды-компаньона на белый карлик. Масса белого карлика постепенно увеличивается, и в какой-то момент силы гравитации превосходят силы давления вырожденного электронного газа в карлике — происходит коллапс звезды с последующим взрывом сверхновой. Для всех белых карликов взрыв происходит примерно при одном значении массы звезды (≈ 1.4 масс Солнца), что вкупе со схожестью их химического состава даёт почти одинаковую

картину взрыва. Таким образом, стандартизуемость кривых блеска объясняется в данном сценарии, однако он не является разработанным до конца и пока остаётся лишь гипотезой.

Для данной работы важна ещё одна особенность кривых блеска сверхновых типа Ia: спад этих кривых после точки максимальной интенсивности соответствует β -распадам двух радиоактивных изотопов: ^{56}Ni распадается в ^{56}Co , который, в свою очередь, распадается в стабильные ядра железа ^{56}Fe . Этот факт был установлен экспериментально и проверен довольно точно в недавних работах [3, 4], изучающих соответствующие данным изотопам линии γ -излучения в спектре сверхновой SN2014J. Обнаружение данных линий к тому же согласуется с моделями термоядерного взрыва белого карлика, поэтому данные эксперименты можно считать доказательством природы сверхновых типа Ia, хотя конкретные сценарии, приводящие к взрыву, до сих пор достоверно не установлены. Соответствие спада кривой блеска двум радиоактивным распадам влечёт за собой то, что зависимость интенсивности от времени на двух участках хорошо аппроксимируется убывающими экспонентами.

Описанные выше два свойства кривых блеска сверхновых типа Ia — стандартизуемость и экспоненциальный спад — являются ключевыми для проведённого исследования. Метод, в основе которого лежат эти идеи, был предложен в [8] и уже был использован в [7] для определения вариации G_F в пределах малых красных смещений ($z < 0.024$). В данной работе на основе анализа более обширных данных для гораздо больших красных смещений ($z \lesssim 1$) было получено новое, уточнённое ограничение на вариацию константы Ферми.

3 Экспериментальные данные

Для определения вариации константы распада ^{56}Ni было взято 687 сверхновых из выборки JLA, доступной на странице http://supernovae.in2p3.fr/sdss_snls_jla/ReadMe.html (наблюдательные данные SDSS и SNLS), а также 40 сверхновых из выборки SCP Perlmutter et al. (1999), доступной на странице <http://supernova.lbl.gov/Union/>. Благодаря последней выборке в 1999 году впервые было показано, что Вселенная расширяется с ускорением, а

благодаря выборке JLA были сделаны последние, самые точные оценки космологических параметров. В обеих выборках для каждой сверхновой доступны красное смещение и значения интенсивности в зависимости от времени, снятые в различных фотометрических фильтрах UBVRIJHK. Красные смещения используемых сверхновых пробегают значения $0 < z \lesssim 1$. Значения длин волн, соответствующие определённым фильтрам, приведены в таблице ниже:

Фильтр	Длина волны, нм
U	365
B	440
V	550
R	720
I	900
J	1250
H	1650
K	2200

При выполнении данного исследования были взяты значения интенсивности, полученные в R-фильтре. Затем для каждой сверхновой по её красному смещению была определена начальная длина волны излучения, соответствующая измеренной на Земле интенсивности в R-фильтре. А именно, так как

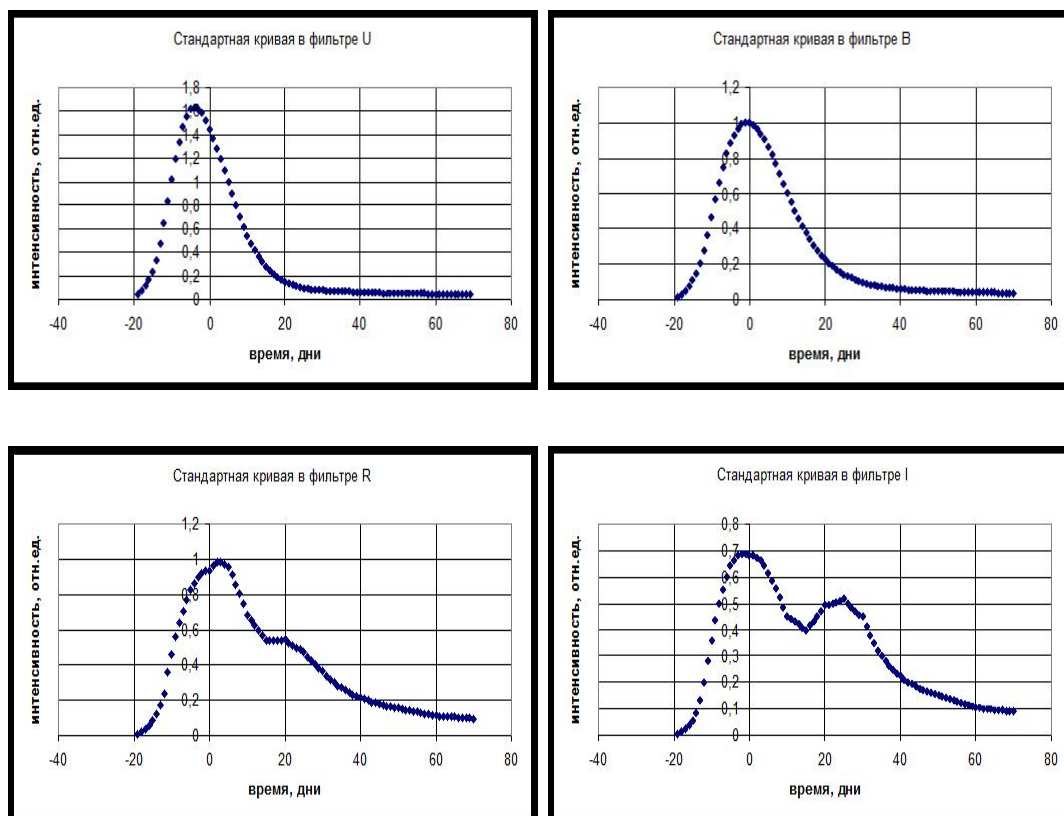
$$1 + z = \frac{\lambda_R}{\lambda_0} \quad (2)$$

по определению, где λ_0 — длина волны, испущенная сверхновой, а $\lambda_R = 720$ нм, то испущенная длина волны равна $\lambda_0 = 720/(1 + z)$ нм. По полученному значению длины волны для каждой кривой блеска выбиралась соответствующая шаблонная кривая.

4 Построение стандартных кривых блеска

В данной работе был придуман свой алгоритм для K-коррекции: учёта зависимости формы кривой блеска сверхновой от длины волны. Для построения итогового

шаблона были взяты стандартные кривые блеска в восьми фильтрах UBVRIJK, доступные на странице https://c3.lbl.gov/nugent/nugent_templates.html. Эти кривые блеска являются хорошо измеренными зависимостями видимой звёздной величины от времени для очень близких ($z \approx 0$) сверхновых типа Ia с параметром растяжения по оси времени, положенным равным единице ($s \equiv 1$). Ниже приведены для примера шаблонные кривые блеска в четырёх фильтрах (звёздная величина была пересчитана в интенсивность):



Далее была проведена линейная интерполяция стандартных кривых блеска по длине волны и получена итоговая шаблонная функция двух переменных: времени и длины волны.

Теперь, чтобы получить стандартную кривую блеска на некоторой длине волны, берутся отдельные точки по дням, соответствующие необходимой длине волны, и интерполируются уже с помощью кубических сплайнов. Таким образом, в результате для каждой сверхновой, измеренной с помощью R-фильтра, подбирается соответствующая ей стандартная кривая блеска, необходимая для дальнейшей процедуры фитирования.

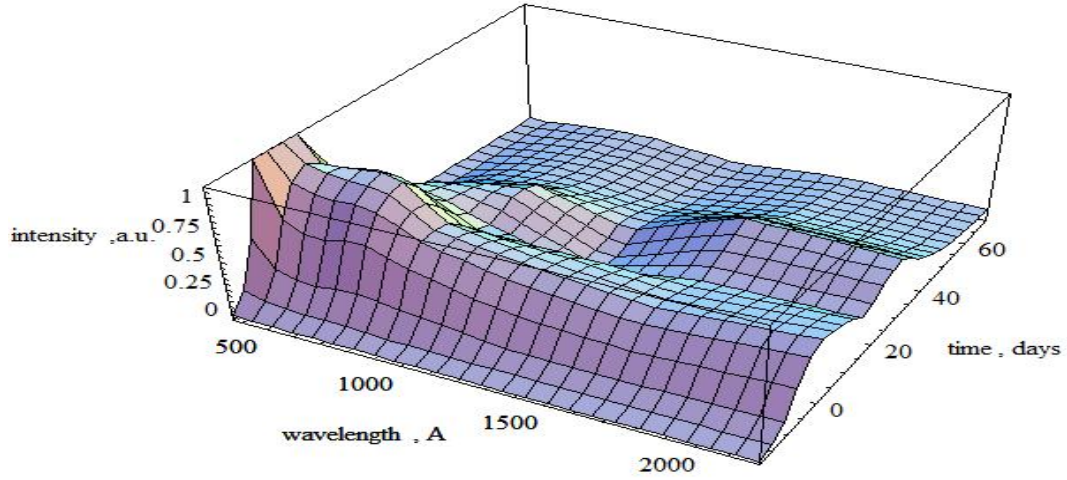


Рис. 1. Эталонная зависимость интенсивности сверхновой типа Ia от времени и длины волны

5 Фитирование

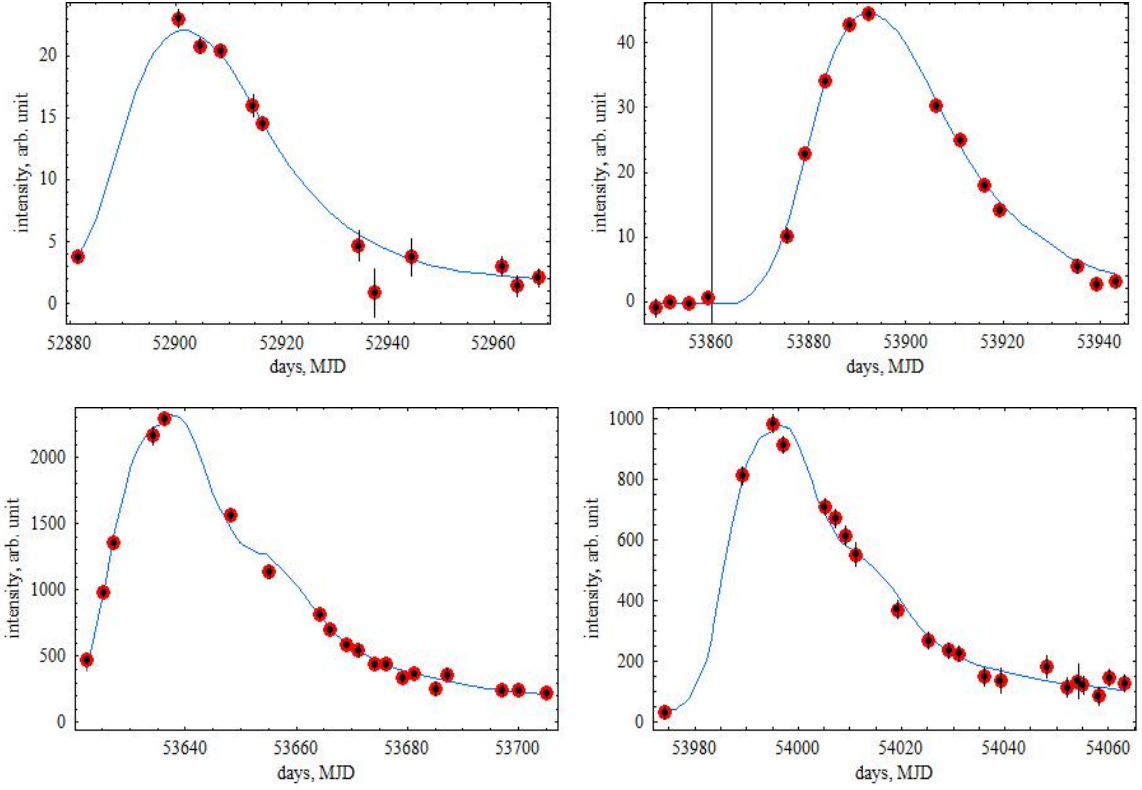
Раскроем наконец более полно природу стандартизуемости кривых блеска. Кривые блеска сверхновых типа Ia представляют из себя четырёхпараметрическое семейство кривых и могут быть заданы с помощью зависимости

$$I = I_0 \left[f \left(\frac{t - t_0}{w} \right) + b \right], \quad (3)$$

где f — функция, соответствующая стандартной кривой блеска для данной длины волны, I_0 — интенсивность в максимуме кривой, t_0 — соответствующее время, w — фактор растяжения кривой по оси времени, b — малый параметр, связанный с фоном от родительской галактики.

Было проведено фитирование экспериментальных данных с помощью данной зависимости и для каждой сверхновой были определены все четыре параметра фита. Экспериментальные данные показали хорошее согласие с теорией: точки зависимости интенсивности от времени практически всегда ложатся на растянутую в w раз стандартную кривую блеска. Ниже приведено несколько примеров фита, хотя они едва ли охватывают всё разнообразие более семисот фитированных кривых блеска.

Фактор w , отвечающий за растяжение стандартной кривой блеска по оси времени,



на самом деле складывается из двух составляющих:

$$w = s \cdot (1 + z), \quad (4)$$

где учтено растяжение в $1 + z$ раз оси времени, связанное с различием временных интервалов в системе сверхновой и в системе Земли, возникающим из-за ненулевой относительной скорости этих двух систем отсчёта вследствие расширения Вселенной.

Параметр s , так называемый stretch-factor, — это величина, обычно слабо отличающаяся от единицы. Его значение было рассчитано для каждой сверхновой из параметра фита w . Для настоящей задачи важна возможная зависимость фактора s от красного смещения z , так как этот фактор тесно связан с вариацией постоянной распада ^{56}Ni .

6 Константа распада ^{56}Ni

Первая половина спада кривой блеска сверхновой типа Ia соответствует распаду ^{56}Ni и может быть фитирована экспонентой $\exp(-\lambda't)$, где λ' — некоторая константа. Так, для данного участка стандартной ($s = 1$) кривой блеска в фильтре В в

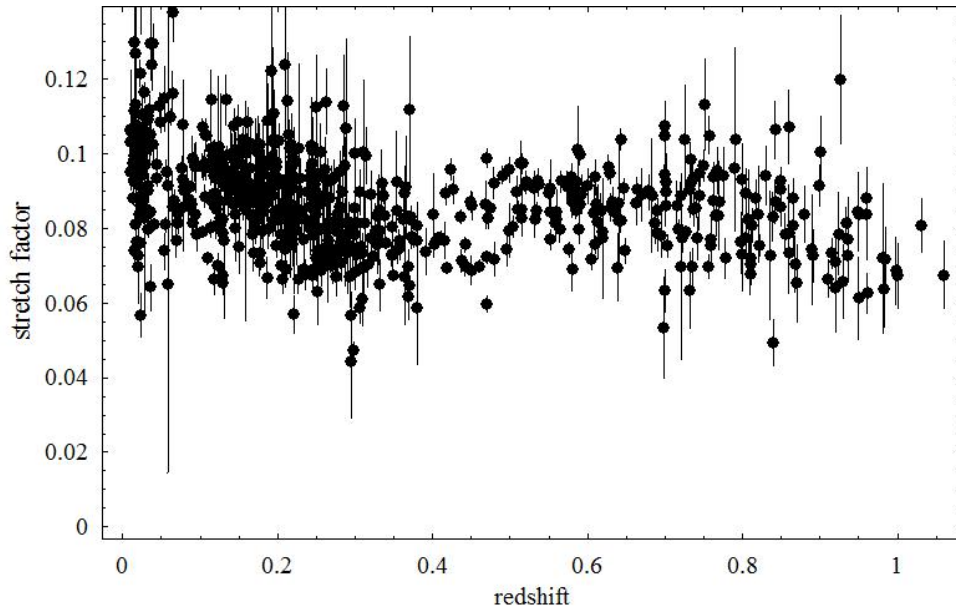


Рис. 2. График зависимости параметра s кривой блеска сверхновой от её красного смещения

логарифмическом масштабе по оси ординат были определены параметры линейной регрессии, в частности коэффициент λ'_{st} — «стандартная» константа λ' :

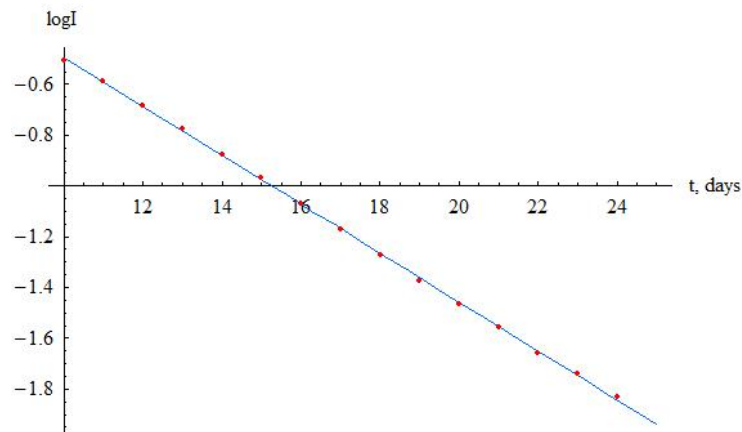


Рис. 3. График зависимости логарифма интенсивности от времени

$$\lambda'_{st} = 0.0964 \pm 0.0005 \quad (5)$$

Оказывается, что данное значение константы λ' немного меньше, чем значение константы распада ^{56}Ni , измеренное на Земле ($\lambda(^{56}\text{Ni}) = 0.11410 \pm 0.00019$). Это связано с

тем, что, хотя светимость сверхновой на спаде кривой блеска определяется распадом ^{56}Ni и поэтому спадает по экспоненте, само излучение является результатом взаимодействия электронов β -распада с веществом — и из-за этой дополнительной стадии весь процесс распада кажется более длительным (ведь мы на Земле наблюдаем γ -кванты, а не первичные электроны распада). Таким образом, наблюдаемый период полураспада оказывается больше ожидаемого, а наблюдаемая константа распада — меньше (пропорциональна обычной константе распада с коэффициентом, меньшим единицы). Для данной работы важна лишь относительная вариация константы распада, которая равна относительной вариации наблюдаемой константы распада, поэтому в дальнейшем мы будем оперировать именно константой λ' . Так как на данном участке кривой блеска $I \sim \exp(-\lambda't)$, растяжение кривой по оси времени в s раз эквивалентно увеличению константы распада в то же число раз. Таким образом, $\lambda' \sim s$, при этом коэффициент пропорциональности равен найденному ранее значению λ'_{st} . Теперь можно пересчитать зависимость s от z в зависимость λ' от z , а затем с помощью этих данных получить ограничения на вариацию константы распада ^{56}Ni . Можно было бы получить искомые ограничения непосредственно из зависимости s от z , так как $\lambda \sim \lambda' \sim s$, но в данной работе был сделан дополнительный шаг, чтобы убедиться, что мы имеем дело именно с распадом ^{56}Ni вида $I \sim \exp(-\lambda t)$.

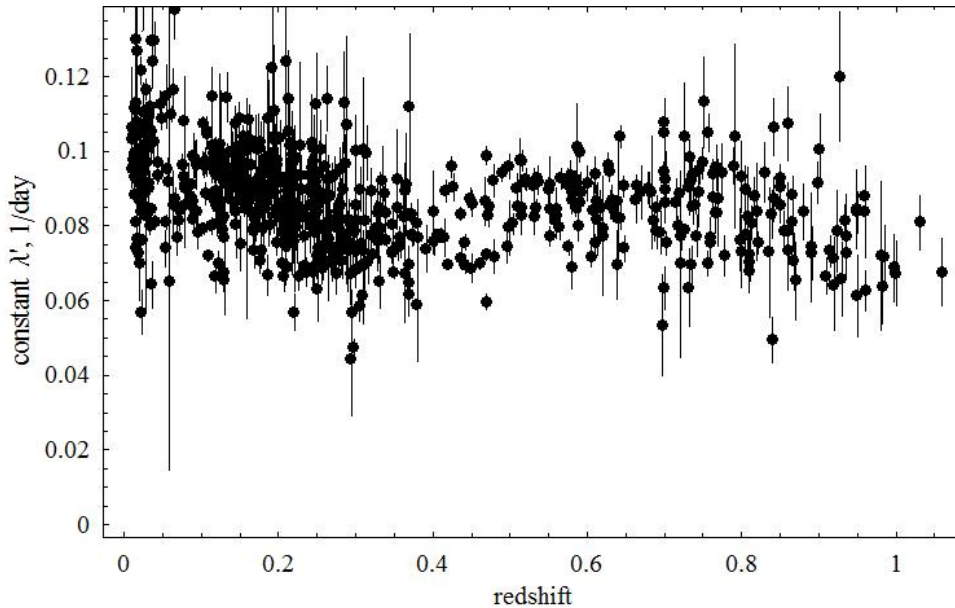


Рис. 4. График зависимости константы λ' от красного смещения

7 Результаты

Данные зависимости λ' от z были фитированы линейной функцией, чтобы определить возможное значение наклона $\Delta\lambda'$. При этом к уже существующей погрешности значений константы распада была добавлена некоторая систематическая погрешность, так, чтобы значение плотности вероятности распределения хи-квадрат было равно 50% для данного значения хи-квадрат. Добавленная погрешность крайне слабо повлияла на итоговый результат (разница в четвёртой цифре после запятой для выборки JLA), но зато была учтена некоторая неизвестная систематическая погрешность, связанная с неодинаковыми условиями проведения эксперимента, поглощением в галактической пыли и другими неучтёнными эффектами. Подобная процедура была проведена с обеими выборками: JLA и SCP Perlmutter 1999 (P99).

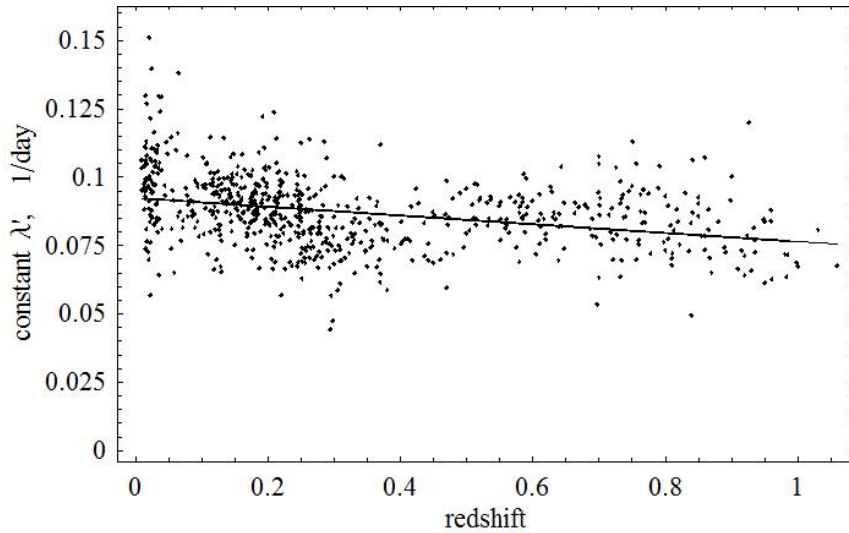


Рис. 5. Возможный наклон $\Delta\lambda'$ зависимости константы λ' от красного смещения для выборки JLA

Видно, что выборка P99 позволяет определить возможную вариацию гораздо хуже выборки JLA, что и ожидалось исходя из малого размера этой выборки вкупе с довольно большими погрешностями.

В результате были получены значения вариации константы распада ^{56}Ni .

- Выборка JLA

$$\Delta\lambda' = -0.0168 \pm 0.0019, \quad (6)$$

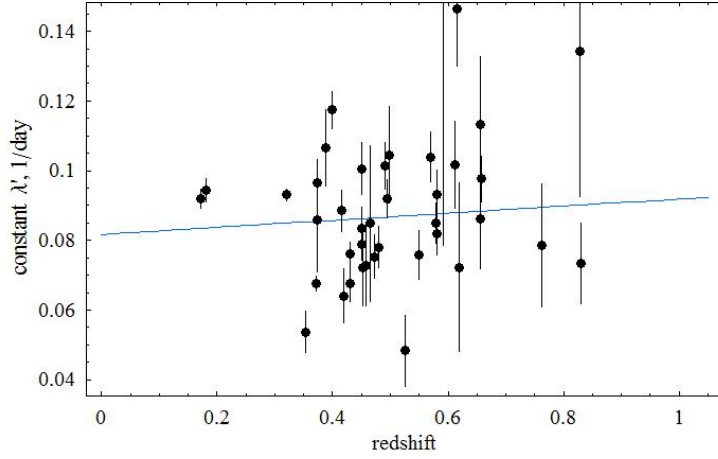


Рис. 6. Возможный наклон $\Delta\lambda'$ зависимости константы λ' от красного смещения для выборки P99

где $\Delta\lambda' = \lambda'(z = 1.06) - \lambda'(z = 0.009819)$.

Относительная вариация константы распада равна:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda(z=0)} = -0.182 \pm 0.021. \quad (7)$$

Так как

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = 2\frac{\Delta G_F}{G_F}, \quad (8)$$

где Γ — ширина распада, G_F — константа Ферми, то:

$$\frac{\Delta G_F}{G_F} = -0.091 \pm 0.010. \quad (9)$$

- Выборка P99

Аналогично получаем, что

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.08 \pm 0.17, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta G_F}{G_F} = 0.04 \pm 0.09. \quad (11)$$

Видно, что значения, рассчитанные по двум различным выборкам, согласуются друг с другом, при этом выборка JLA даёт гораздо более точные результаты.

Итак, можно получить ограничение на относительную вариацию константы Ферми при $0 < z \lesssim 1$:

$$\left| \frac{\Delta G_F}{G_F} \right| < 0.111 \quad (95\% \text{ CL}). \quad (12)$$

Это значение вместе со значением возможной относительной вариации константы распада ^{56}Ni

$$\left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| < 0.223 \quad (95\% \text{ CL}) \quad (13)$$

и являются окончательным результатом проделанной работы.

8 Заключение

В работе были получены ограничения на относительные пространственно-временные вариации константы распада ^{56}Ni (13) и константы Ферми (12) в пределах красных смещений $0 < z \lesssim 1$. Хотя формулы (7) и (9) свидетельствуют об убывании констант с увеличением z , обе константы измеряются не напрямую, и поэтому не менее вероятной, чем изменение констант, причиной данного эффекта могут служить различия сверхновых с разными z по химическому составу (например, уменьшение металличности с ростом z) или другие неучтённые систематические эффекты. В будущем, при расчёте вклада возможных систематических эффектов, ограничения на вариацию констант могут быть улучшены. Тем не менее, на данный момент полученные в работе ограничения пространственно-временной вариации постоянной распада ^{56}Ni являются лучшими среди подобных ограничений. Ниже приведена таблица с полученными в данной области результатами. Помимо кривых блеска сверхновых, для определения относительной вариации констант β -распада различных изотопов также использовались данные по составу метеоритов.

Надо учитывать, что перевод этих ограничений в ограничения вариации константы G_F , проделанный в данной работе, требует дополнительных модельных предположений. Так как распад осуществляется посредством слабого взаимодействия, его скорость должна быть пропорциональна G_F^2 , что используется в данной работе. Однако в коэффициенте пропорциональности присутствуют зависимости от постоянной тонкой структуры α и от отношения масс протона и электрона. На настоящее время

Изотоп	Метод	Результат	Красное смещение	Ссылка
сверхновые типа Ia	> -0.223	1.0	данная работа	
сверхновые типа Ia	-0.272 ± 0.156	0.024		[7]
метеориты	-0.016 ± 0.016	0.45		[9]

Таблица 1. Сравнение ограничений на вариацию констант β -распада, полученных различными методами.

показано, что вариации этих величин крайне малы (гораздо меньше вариаций, полученных для константы распада в данной задаче), поэтому в работе этими вариациями пренебрегается.

Константа Ферми G_F напрямую связана с вакуумным средним хиггсовского поля v : $G_F \sim \frac{1}{v^2}$. Поэтому из ограничения на относительную вариацию G_F можно получить ограничение на относительную вариацию v :

$$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta G_F}{2G_F} = 0.046 \pm 0.005 \quad (14)$$

Ниже для сравнения приведена таблица полученных в различных работах разными методами ограничений вариации вакуумного среднего поля Хиггса:

Метод	Результат	Красное смещение	Ссылка
сверхновые типа Ia	< 0.056	1.0	данная работа
сверхновые типа Ia	0.068 ± 0.039	0.024	[7]
метеориты	0.004 ± 0.004	0.45	[9]
первичный нуклеосинтез	0.0134 ± 0.0014	$\sim 10^8$	[10]
первичный нуклеосинтез	0.004 ± 0.002	$\sim 10^8$	[11]

Таблица 2. Сравнение ограничений на вариацию v , полученных различными методами.

Список литературы

1. S. Perlmutter et al., 'Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae', *The Astrophysical Journal* **517** (1999), Issue 2, pp. 565-586 [arXiv:astro-ph/9812133v1].
2. M. Betoule et al., 'Improved cosmological constraints from a joint-analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples', *Astronomy & Astrophysics* **568** (2014), id.A22, 32 pp.[arXiv:1401.4064v2].
3. R. Diehl et al., 'Early ^{56}Ni decay γ -rays from SN2014J suggest an unusual explosion', *Science* **345** (2014), Issue 6201, pp. 1162-1165 [arXiv:1407.3061 [astro-ph.HE]].
4. E. Churazov et al., 'First detection of ^{56}Co gamma-ray lines from type Ia supernova (SN2014J) with INTEGRAL', *Nature* **512** (2014), Issue 7515, pp. 406-408 [arXiv:1405.3332 [astro-ph.HE]].
5. Rodrigo C. V. Coelho et al., 'Standardization of type Ia supernovae', *European Journal of Physics* **36** (2015), Issue 1, article id. 015007 [arXiv:1411.3596v1 [astro-ph.CO]].
6. G. Goldhaber et al., 'Time-scale Stretch Parameterization of Type Ia Supernova B-band Light-curves', *The Astrophysical Journal* **558** (2001), Issue 1, pp. 359-368 [arXiv:astro-ph/0104382v1].
7. A. Ferrero and B. Altschul, 'Limits on the Time Variation of the Fermi Constant G_F Based on Type Ia Supernova Observations', *Phys. Rev. D* **82** (2010) 123002 [arXiv:1008.4769 [hep-ph]].
8. R. J. Scherrer, D. N. Spergel, 'How constant is the Fermi coupling constant?', *Phys. Rev. D* **47**, 4774 (1993).
9. K. A. Olive *et al.*, "A Re-examination of the Re-187 bound on the variation of fundamental couplings," *Phys. Rev. D* **69** (2004) 027701 [astro-ph/0309252].
10. M. E. Mosquera and O. Civitarese, "Effect of the variation of the Higgs vacuum expectation value upon the deuterium binding energy and primordial abundances of D and He-4," *Astron. Astrophys.* **520** (2010) A112.

11. S. J. Landau *et al.*, “Early Universe Constraints on Time Variation of Fundamental Constants,” *Phys. Rev. D* **78** (2008) 083527 [arXiv:0809.2033 [astro-ph]].
12. M. J. Duff, ‘How fundamental are fundamental constants?’, arXiv:1412.2040 [hep-th].

Приложение

Листинг программы, написанной в Wolfram Mathematica 5 для создания общего шаблона, фитирования кривых блеска и обработки полученных результатов.

```
<< Graphics'Graphics'
template = Import["d:\Documents\coursework\hemplates\hluxtemplates.txt", \
"Table"]
template = Drop[template, 1];
l = {365, 440, 550, 720, 900, 1250, 1650, 2200};
tf = {};
tf = PadRight[tf, 8*Length[template]];
For[j = 2, j <= 9, j++,
  t = template[[All, {1, j}]];
  For[i = 1, i < Length[template] + 1, i++, tf[[i + (j - 2)*
    Length[template]]] = Prepend[t[[i]], l[[j - 1]]]]]
f1 = Interpolation[tf, InterpolationOrder -> 1]
st = {};
functab = {};
<< Statistics'NonlinearFit'
SetDirectory["d:\Documents\coursework\data\JLA\jla_light_curves"]
files = FileNames["lc*"];
Length[files]
For[i = 1, i <= 693, i++,
  data1 = Import[files[[i]], "Table"];
z = Extract[data1, Part[Position[data1, "@Redshift" | "@Z_CMB",
  Infinity, 1] + {{0, 1}}, 1]]; If[z == {}, Continue[]];
lambda = 720/(1 + z);
For[j = -19, j < 71, j++, functab = Append[functab, {j, f1[lambda, j]}]];
For[g = -20, g >= -100, g--, functab = Prepend[
  functab, {g, f1[lambda, -19]}]];
f[x_] = Evaluate[Interpolation[functab][x]];
```

```
dataerr = Part[data1, Position[data1, "MEGACAMPSF::r  
" | "SDSS::r" | "  
STANDARD::R" | "4SHOOTER2::R" | "SWOPE2::r" |  
"KEPLERCAM::r"][[All, 1]] [[All, {1, 2,  
3}]]; If[dataerr == {}, Continue[]];  
fluxes = dataerr[[All, 2]];  
Fluxmax = Max[fluxes];  
Daymax = Extract[data1, Part[Position[data1, Fluxmax, Infinity, 1] - {{0,  
1}}, 1]];  
For[k = 1, k <= Length[dataerr], k++, If[dataerr[[All, 1]][[k]] > Daymax + \  
70 || dataerr[[All, 1]][[  
k]] < Daymax - 50, dataerr = Drop[dataerr, {k}]; k--];];  
If[dataerr == {}, Continue[]];  
days = dataerr[[All, 1]];  
Daymin = Min[days];  
Daym = Max[days];  
data = dataerr[[All, {1, 2}]];  
w = 1/Transpose[dataerr[[All, {3}]]][[1]]^2;  
app[x_] = NonlinearFit[data, a(f[(x - t1)/(s(z + 1))] +  
b), x, {{a, Fluxmax}, {t1,  
Daymax}}, {s, 1}, {b, 0.001}}, Weights -> w];  
par = ParameterCITable /. NonlinearRegress[data, a(f[(x -  
t1)/(s(z + 1))] + b), x, {{a, Fluxmax}, {t1, Daymax}}, {s,  
1}, {b, 0.001}},  
Weights ->  
w, RegressionReport -> {BestFitParameters, ParameterCITable,  
AsymptoticCorrelationMatrix}];  
functab = {};  
si = {files[[i]], z, par[[1, 1]], par[[1, 3]]};  
st = Append[st, si]; Print[i]; Print[  
files[[i]]; DisplayTogether[Plot[app[x], {x,
```

```
Daymin, Daym}, PlotStyle ->
Hue[.6]], ListPlot[data, PlotStyle -> {Hue[
0], PointSize[0.03]}], ErrorListPlot[dataerr], Frame -> True,
FrameLabel -> {"days, MJD", "intensity, arb.
unit"}, TextStyle -> {FontFamily -> "Times", FontSize -> 14}]]
temp = {};
For[j = 10, j < 25, j++, temp = Append[temp, {j, Log[f1[l[[2]], j]]}]];
ListPlot[temp]
<<Statistics'LinearRegression'
reg = Regress[temp, {1, x}, x]
const = -reg[[1, 2, 1, 2, 1]]
scon = reg[[1, 2, 1, 2, 2]]
func = reg[[1, 2, 1, 1, 1]] + x*reg[[1, 2, 1, 2, 1]]
DisplayTogether[Plot[func, {x, 10, 25}, PlotStyle -> Hue[.6]], ListPlot[temp,
PlotStyle -> {Hue[0], PointSize[0.01]}]]
str = st
Length[str]
namest = {};
For[i = 1, i <= 687, i++, namest = Append[namest, {
str[[i, 1]], str[[i, 2]], str[[i, 4]][[1]], str[[i, 4]][[2]]}]]
For[i = 1, i < 688,
i++, namest = ReplacePart[namest, namest[[i, 3]]*const, {i, 3}];
namest = ReplacePart[namest, namest[[i, 4]]*const, {i, 4}];
stzerr = {};
For[i = 1, i <= 687, i++, stzerr = Append[stzerr, {
str[[i, 2]], str[[i, 4]][[1]], str[[i, 4]][[2]]}]]
ErrorListPlot[stzerr, Frame -> True, FrameLabel -> {"redshift
", "stretch factor"}, TextStyle -> {FontFamily -> "Times", FontSize -> \
16}]
For[i = 1, i < 688, i++, stzerr = ReplacePart[stzerr, stzerr[[i,
2]]*const, {i, 2}];
```

```
stzerr = ReplacePart[stzerr, stzerr[[i, 3]]*const, {i, 3}];
stz = ReplacePart[stz, stz[[i, 2]]*const, {i, 2}]]
stzerr
DisplayTogether[ListPlot[stz, PlotStyle -> {Hue[0], PointSize[0.01]}], \
ErrorListPlot[
    stzerr], Frame ->
    True, FrameLabel -> {
        "redshift", "decay constant, 1/day"}, TextStyle -> {FontFamily -> \
"Times", FontSize -> 16}]
w = 1/(stzerr[[All, 3]]^2 + 0.011462^2);
reg = Regress[stz, {1, x}, x, Weights -> w]
Regress[stz, {1, x}, x, Weights ->
    w, RegressionReport -> ParameterConfidenceRegion]
Show[Graphics[Ellipsoid[{0.09241016837687359', -0.015988985009110016'}, \
{0.004661428024312646', 0.0010819033143134801'}, {-0.3183122351076644',
    0.9479859286828908'}, {0.9479859286828908',
    0.31831223510766443'}]]], Frame -> True, AspectRatio -> 1, PlotRange \
-> {{0.09, 0.095}, {-0.01, -0.025}}]
reg = Regress[stz, {1, x},
    x, Weights -> w, RegressionReport -> ParameterCITable]
regress = Regress[stz, {1, x}, x, Weights->w,
RegressionReport ->
    {FitResiduals, SinglePredictionCITable,
    ParameterConfidenceRegion}]
errors = FitResiduals /. regress
{observed, predicted, se, ci} =
    Transpose[(SinglePredictionCITable /. regress)[[1]]];
ListPlot[Transpose[{predicted, errors}]]
xval = Map[First, stz];
predicted = Transpose[{xval, predicted}];
lowerCI = Transpose[{xval, Map[First, ci]}];
```

```
upperCI = Transpose[{xval, Map[Last, ci]};
<<Graphics'MultipleListPlot'
MultipleListPlot[
  stz, predicted, lowerCI, upperCI,
  SymbolShape -> {PlotSymbol[Diamond], None, None,
  None},
  PlotJoined -> {False, True, True, True}, PlotStyle -> {Automatic, Automatic,
  Dashing[ {.05, .05}], Dashing[ {.05, .05}]}, Frame -> True, FrameLabel -> {"redshift",
  1/day"}, TextStyle -> {FontFamily -> "Times", FontSize -> 16}
]
Show[Graphics[ParameterConfidenceRegion /. regress],
  Axes -> True, AxesLabel -> {"Constant", "x"}]
bias = reg[[1, 2, 1, 2, 1]]
sbi = reg[[1, 2, 1, 2, 2]]
free = reg[[1, 2, 1, 1, 1]]
sc = reg[[1, 2, 1, 1, 2]]
func = reg[[1, 2, 1, 1, 1]] + x*reg[[1, 2, 1, 2, 1]]
DisplayTogether[Plot[func, {x, 0, 1.05}, PlotStyle ->
  Hue[.6]], ListPlot[stz, PlotStyle -> {Hue[0], PointSize[0.01]}], \
ErrorListPlot[stzerr], Frame -> True,
  FrameLabel -> {"redshift
  ", "decay constant, 1/day"}, TextStyle -> {FontFamily ->
  "Times", FontSize -> 16}]
zmin = Min[stz[[All, 1]]]
zmax = Max[stz[[All, 1]]]
delta = (zmin - zmax)*bias
delta/free
sdel = -(zmin - zmax)*sbi
result = delta/(2*free)
sres = result*((sc/free)^2 + (sdel/delta)^2)^(1/2)
boundres = 1.96*sres
```

$$\text{slam} = \text{delta/free} * ((\text{sc/free})^2 + (\text{sdel/delta})^2)^{(1/2)}$$

$$\text{boundlam} = 1.96 * \text{delta/free} * ((\text{sc/free})^2 + (\text{sdel/delta})^2)^{(1/2)}$$