

Спектроскопия квазаров и космология

Изменились ли значения фундаментальных констант за десять миллиардов лет?

Д. А. Варшалович, А. Ю. Потехин



Дмитрий Александрович Варшалович, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий сектором теоретической астрофизики Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург). Основные научные интересы — эволюция химического состава и крупномасштабной структуры Вселенной, спектроскопия квазаров и межзвездной среды. Автор монографии (совместно с А. Н. Москалевым и В. К. Херсонским) «Квантовая теория углового момента» (Л., 1975).



Александр Юрьевич Потехин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же сектора. Занимается физикой нейтронных звезд, атомными процессами и процессами переноса в квантовых магнитных полях, космологией.

ВСЕ ИЗВЕСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ природы и все физические эксперименты, к какой бы области физики они ни относились, могут быть согласованно описаны в рамках стандартной модели фундаментальных взаимодействий и общей теории относительности. Такое описание зависит от набора параметров, которые называют фундаментальными физическими константами. Эти параметры определяются из опыта, поскольку современная теория не способна дать их численные значения. В табл. 1 приведены значения в системе единиц СГС наиболее часто используемых фундаментальных постоянных. Они были бы совсем иными в другой системе единиц (например, СИ), поэтому действительно фундаментальную роль играют только безразмерные комбинации физических постоянных. Некоторые из таких комбинаций приведены в табл. 2.

В настоящее время фундаментальные постоянные измерены с относительной погрешностью порядка 10^{-6} . Воспроизводимость таких измерений исключает значительную вариацию этих параметров за небольшой промежуток времени, но не исключает их изменения за время существования Вселенной (~15 млрд. лет).

Современная теория, в принципе, допускает и, более того, предсказывает изменение физических констант в процессе космологической эволюции. Однако разные варианты теории предсказывают различную зависимость от «возраста» Вселенной — космологического времени.

© Варшалович Д. А., Потехин А. Ю. Спектроскопия квазаров и космология. Изменились ли значения фундаментальных констант за десять миллиардов лет?

Таблица 1
Фундаментальные физические константы*

Фундаментальная константа	Современное значение
Скорость света в вакууме c	29 979 245 800 см/с
Постоянная Планка \hbar	$1.054\ 572\ 66(63) \times 10^{-27}$ эрг·с
Постоянная тяготения G	$6.672\ 59(85) \times 10^{-8}$ эрг·см·г ⁻²
Заряд электрона e	$4.803\ 206\ 68(15) \times 10^{-10}$ (эрг·см) ^{1/2}
Масса электрона m_e	$9.109\ 3897(54) \times 10^{-28}$ г
Масса протона m_p	$1.672\ 6231(10) \times 10^{-24}$ г
Масса нейтрона m_n	$1.674\ 9286(10) \times 10^{-24}$ г

* В таблице приведены взаимно согласованные значения некоторых фундаментальных постоянных, принятые Международной комиссией по фундаментальным константам CODATA (1986—1992). В скобках указана погрешность в последних двух значащих цифрах (на уровне одного стандартного отклонения). Скорость света дана без погрешности, потому что ее значение в настоящее время принято по определению как переводной множитель от единиц времени к единицам длины (1 см — это путь, который свет проходит за 1 с, разделенный на численное значение c).

Таблица 2
Безразмерные фундаментальные константы*

Фундаментальная константа	Современное значение
Постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2 / (\hbar c)$	1/137.035 992 22(94)
Безразмерная постоянная гравитации $\alpha_G = Gm_p^2 / (\hbar c)$	$5.904\ 62(39) \times 10^{-39}$
Отношение масс протона и электрона $\mu = m_p / m_e$	1836.152 701(37)
Отношение масс нейтрона и электрона $\nu = m_n / m_e$	1838.683 662(40)

* В скобках указаны значения погрешности, аналогично табл. 1.

Здесь мы дадим общий обзор проблемы и приведем результаты выполненных в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН работ по исследованию спектров далеких квазаров, которые позволили установить новые, значительно более жесткие верхние пределы возможного изменения трех безразмерных констант: постоянной тонкой структуры α , отношения масс протона и электрона $\mu = m_p / m_e$ и отношения суммарной массы протона и нейтрона к массе электрона $\mu + \nu = (m_p + m_n) / m_e$.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Проблема возможного изменения фундаментальных физических констант впервые обсуждалась в 1937 г. астрофизиком Е. Милном¹ и одним из создателей квантовой механики П. Дираком, выдвинувшим свою знаменитую «гипотезу больших чисел»². Дирак обратил внимание на то, что некоторые безразмерные комбинации физических параметров (например, отношение сил электромагнитного и гравитационного взаимодействия двух протонов $e^2 / (Gm_p^2) = \alpha / \alpha_G \sim 10^{36}$; см. табл. 2) имеют очень большие значения, по порядку величины близкие к отношению двух времен: современного «возраста» Вселенной t_0 и времени, за которое свет пересекает диаметр атома. Он предположил, что это соотношение должно выполняться при любом значении космологического времени t , а не только в настоящий момент (при $t = t_0$),

¹ Milne E. A. Kinematics, Dynamics and the Scale of Time // Proc. R. Soc. London (A). 1937. V. 158. P. 324; Milne E. A. Constant of Gravitation // Nature. 1937. V. 139. P. 409. Милн, по-видимому, был первым, кто четко указал, что последовательная космологическая теория не должна зависеть от размерных параметров.

² Dirac P. A. M. The Cosmological Constants // Nature. 1937. V. 139. P. 323; Dirac P. A. M. A New Basis for Cosmology // Proc. R. Soc. London (A). 1938. V. 165. P. 199. В последней статье Дирак так сформулировал свой принцип: «Любые два из очень больших безразмерных чисел, встречающихся в природе, связаны простым математическим соотношением, в котором коэффициенты равны по порядку величины единице».

и отметил, что это предположение может реализоваться, если постоянная тяготения G изменяется как t^{-1} .

В 1948 г. Э. Теллер указал, что изменение G , согласно первоначальной гипотезе Дирака, привело бы к столь большой светимости Солнца в прошлом, что древние моря должны были бы выкипеть, а это противоречит палеонтологическим данным³. В то же время Теллер отметил, что этим данным нисколько не противоречит ранее выдвинутое предположение о том, что постоянная тонкой структуры α обратно пропорциональна логарифму космологического времени, — предположение, известное с тех пор как «гипотеза Теллера». Исходя из принципа «больших чисел», эту гипотезу можно подкрепить тем обстоятельством, что $\ln(t_0/\tau_p) = 140 \sim 1/\alpha$, т. е. t_0/τ_p и $\exp(\alpha^{-1})$ — большие числа, близкие по порядку величины. Фигурирующая здесь величина $\tau_p = (G\hbar/c^5)^{1/2} = 5.39 \times 10^{-44}$ с — это планковское время, т. е. наименьший временной масштаб, на котором t еще может рассматриваться как непрерывная (не квантованная) динамическая переменная.

Дальнейший импульс обсуждению рассматриваемой проблемы придал Г. Гамов⁴, выдвинувший альтернативную гипотезу⁵: в соотношении Дирака ($\alpha/\alpha_0 \sim t$) не G уменьшается как t^{-1} , а α растет пропорционально t . Однако к тому времени уже были открыты квазизвездные объекты — квазары (о них речь впереди). Выяснилось, что столь «быстрое», по космологическим меркам, изменение α противоречит данным, полученным из спектров квазаров⁶.

В то же время, логарифмическая зависимость постоянной тонкой структуры от космологического времени оставалась допустимой. Более того, в 1972 г. Ф. Дайсон⁷ привел дополнительные теоретические соображения в поддержку гипотезы Теллера в форме $\alpha^{-1} \sim \ln(t/\tau_p)$. При этом он опирался не на «принцип больших чисел», а на квантовую электродинамику, одним из создателей которой он был. Поэтому мы будем называть предположение о наличии указанной зависимости гипотезой Теллера — Дайсона⁸.

Интерес к рассматриваемой проблеме особенно усилился в 1980-е годы, когда заметное развитие получили теории «великого объединения» взаимодействий, при помощи которых физики надеются единым образом описать сильные, слабые, электромагнитные и гравитационные силы и тем самым лучше понять их. Оказалось, что такое объединение предполагает изменение действующих констант в процессе эволюции по крайней мере на ранних этапах развития Вселенной. В частности, современные варианты теории Калуцы — Клейна, основанной на представлениях о многомерном развивающемся пространстве-времени, приводят к конкретным вариантам законов таких изменений.

Кроме того, выяснилось, что наша Вселенная крайне неустойчива к вариациям численных значений фундаментальных постоянных. Даже сравнительно небольшие вариации констант взаимодействия и, соответственно, масс элементарных частиц могут привести не только к качественному изменению состояния вещества, но и к кардинальному изменению структуры всей Вселенной. Так, увеличение массы протона всего на 0.08 % неминуемо приведет к превращению всех протонов в нейтро-

³ Teller E. On the Change of Physical Constants // Phys. Rev. 1948. V. 73. P. 801.

⁴ Имя Гамова до недавнего времени замалчивалось в нашей стране из-за того, что он покинул СССР в 1933 г. См. в связи с этим: Горелик Г. Е., Савина Г. А. Гамов... заместитель директора ФИАН // Природа. 1993. № 8. С. 82.

⁵ Gamow G. Electricity, Gravity, and Cosmology // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 759.

⁶ Bahcall J., Schmidt M. Does the Fine-Structure Constant Vary with Cosmic Time? // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 1294.

⁷ Dyson F. J. The Fundamental Constants and their Time Variation // Aspects of Quantum Theory / A. Salam and E. P. Wigner (eds.). Cambridge Univ. Press. 1972. P. 213.

⁸ Состояние проблемы к концу 1970-х годов изложено в научно-популярной книге: Чечев В. П., Крамаровский Я. М. Радиоактивность и эволюция Вселенной. М., 1978.

ны, так что во Вселенной не будет ни атомов, ни молекул. Поэтому изменение констант со временем может вызвать катастрофический для нашей Вселенной фазовый переход.

Итак, непостоянство фундаментальных физических констант, равно как и их неизменность, нуждаются в экспериментальной проверке. Такая проверка важна не только для физики и космологии. Судьба всего окружающего нас мира существенно зависит от того, как ведут себя эти константы со временем.

ПОСТОЯННЫ ИЛИ НЕПОСТОЯННЫ? МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ

Экспериментальные тесты на возможное непостоянство фундаментальных констант можно классифицировать по охватываемым ими пространственно-временным областям Вселенной. Первую группу составляют лабораторные измерения, перекрывающие не более нескольких лет. Вторая группа — это «локальные тесты», относящиеся к Земле и Солнечной системе, которые по времени охватывают до 4.5 млрд. лет. Наконец, третью группу составляют астрофизические методы проверки, базирующиеся на данных внегалактической астрономии. Они перекрывают практически весь период существования Вселенной.

Лабораторные тесты, как правило, заключаются в сравнении эталонов частоты, основанных на разных физических явлениях и, следовательно, зависящих от значений разных физических констант. Если бы константы менялись, то эталоны, первоначально согласованные друг с другом, рассогласовывались бы с течением времени. Как правило, одним из сравниваемых эталонов является цезиевый стандарт частоты, который в настоящее время принят за основу для определения единицы времени. Разные группы исследователей сравнивали с ним частоты

водородного мазера⁹, стабилизированного гелий-неонового лазера¹⁰, мазеров на пучке молекул аммиака¹¹, а также собственные частоты высокодобротных сверхпроводящих СВЧ-резонаторов¹². Точность этих экспериментов позволяла выявить относительные изменения фундаментальных констант на 10^{-11} (миллиардную долю процента) в год, но таких вариаций не было обнаружено.

«Локальные тесты» основаны на анализе тех изменений, которые происходили бы в движении Земли и тел Солнечной системы, а также в физических условиях и в процессах на них, если бы физические константы изменялись. Оказывается, такой анализ способен обеспечить более высокую точность, чем лабораторные измерения, — главным образом, потому, что он позволяет выявить изменения, происшедшие на протяжении гораздо большего времени, иногда — почти всего существования Солнечной системы. Так, анализируя изотопный состав метеоритов и древних геологических пород Земли, удастся оценить характерное для них время α - и β -распада долгоживущих радиоактивных элементов и сравнить его с периодом полураспада, измеренным в лаборатории.

Согласно созданной Гамовым теории α -распада, период полураспада изотопа урана ^{238}U весьма чувствителен к значению постоянной тонкой структуры α . Еще более чувствительным оказывается время β -распада изотопа рения ^{187}Re , содержащегося в железистых метеоритах. Согласно Дайсону¹³, при возрасте этих метеоритов ~ 4.5 млрд. лет относительное изменение α не может превосходить ~ 10^{-14} в год.

⁹ Багаев С. Р., Клементьев В. М., Чеботаев В. П. Об измерении абсолютной частоты He — Ne/CH₄ лазера // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С. 67.

¹¹ Колесницын Н. И., Пушкин С. Б., Пурто В. М. Экспериментальная проверка возможного изменения фундаментальных физических величин // Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. Вып. 7. / Под ред. К. П. Станюковича. М., 1976. С. 208.

¹² Turneure J. P., Stein S. R. // Atom Masses and Fundamental Constants, 5. / J. Sanders, A. Wapstra (eds.). New York, 1976. P. 636.

¹³ Dyson F. J. Op. cit.

⁹ Hellwig H. Atomic Frequency Standards: a Survey // Proc. 28th Ann. Symp. on Frequency Control. Washington, 1974. P. 315.

Еще более жесткая оценка получена в 1976 г. А. И. Шляхтером¹⁴, работавшим в то время в Ленинградском институте ядерной физики. Он использовал данные об изотопном составе Sm и Eu в «отработанном топливе» ядерного реактора, действовавшего 1.8 млрд. лет назад. Речь идет об уникальном природном явлении, открытом на урановом руднике Окло в Габоне. Из-за высокого содержания изотопа ^{235}U в этом районе спонтанно запустилась и поддерживалась в течение около 100 тыс. лет цепная реакция деления урана, аналогичная тем, что идут в современных ядерных реакторах¹⁵. Вследствие резонансных свойств системы тяжелое ядро + медленный нейтрон эта реакция не могла бы поддерживаться в природных условиях Окло, если бы энергия ядерного резонанса сдвинулась за этот период хотя бы на 0.05 эВ. Для такого сдвига достаточно относительного изменения α всего на 10^{-8} . Первоначально отсюда был сделан вывод, что относительное изменение постоянной тонкой структуры составляет не более 10^{-17} в год, однако более тщательный анализ¹⁶ приводит к ограничению на уровне $\sim 10^{-15}$ в год.

Слабое место рассмотренных «локальных тестов» — их зависимость от модели изучаемого явления. Обычно она достаточно сложна и включает целый ряд физических параметров. Если принять во внимание, что эти параметры могли бы меняться синхронно в процессе космологической эволюции, то верхние пределы на возможное изменение фундаментальных констант значительно ослабевают.

Кроме того, было замечено, что при нелинейной зависимости фундаментальных констант от времени, которая допускается современными теориями, ограничения, справедливые для одного временного интервала, не годятся для другого¹⁷. Могла бы также наблюдаться и пространственная зависимость. Иными словами, ограничения, справедливые для Солнечной системы, нельзя произвольно распространять на более далекие области пространства и более ранние стадии жизни Вселенной. Исследовать эти далекие области пространства-времени призвана внегалактическая астрономия.

КВАЗАРЫ — ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ О РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Наши знания об эволюции Вселенной, представления о формировании ее крупномасштабной структуры и изменениях химического состава вещества существенно расширились и уточнились за последние годы. Этот прогресс в космологии в значительной степени связан с детальным исследованием спектров квазаров — этих наиболее удивительных и во многом еще загадочных объектов природы.

Установлено, что квазары — это активные ядра галактик, самые мощные источники энергии во Вселенной (полная мощность их излучения 10^{39} — 10^{41} Вт). Такое чудовищное излучение питается гравитационной энергией, выделяющейся при натекании газа на объекты с высоким гравитационным потенциалом. Это, по всей вероятности, сверхмассивные черные дыры с массой 10^6 — 10^{10} M_{\odot} и характерными размерами 10^9 — 10^{11} км. Излучение часто сопровождается джетами (от англ. jet — струя) — выбросами вещества, протянувшимися на десятки тысяч световых лет.

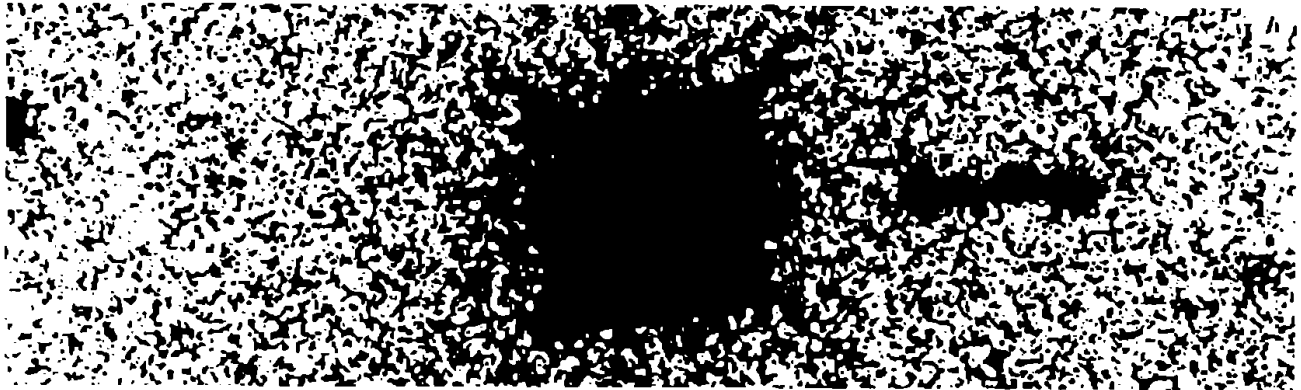
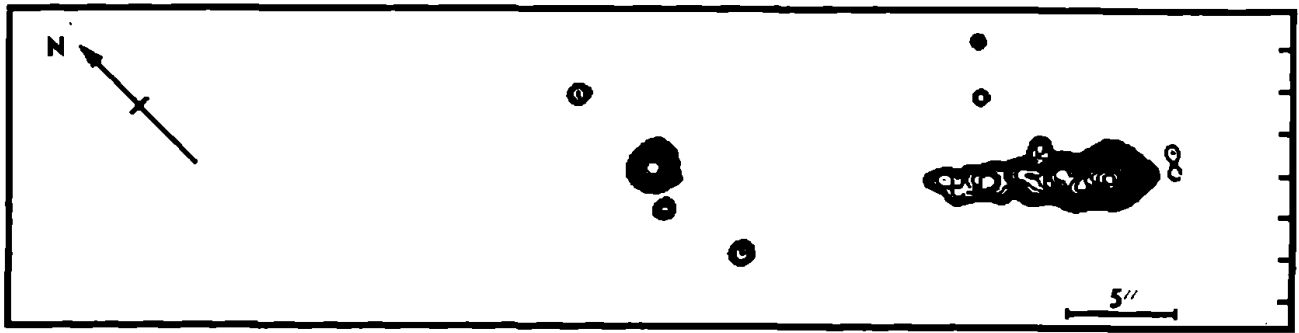
Как наиболее мощные источники излучения квазары видны дальше любых других объектов — вплоть до

¹⁴ Shlyakhter A. I. Direct Test of the Constancy of Fundamental Nuclear Constants // Nature. 1976. V. 264. P. 340.

¹⁵ Эклунд З. Окло — ядерный реактор, запущенный за 18 млн. веков до нашей эры // Природа. 1975. № 11. С. 72; Шварцев С. Л. Природный ядерный реактор в Окло // Природа. 1979. № 12. С. 102.

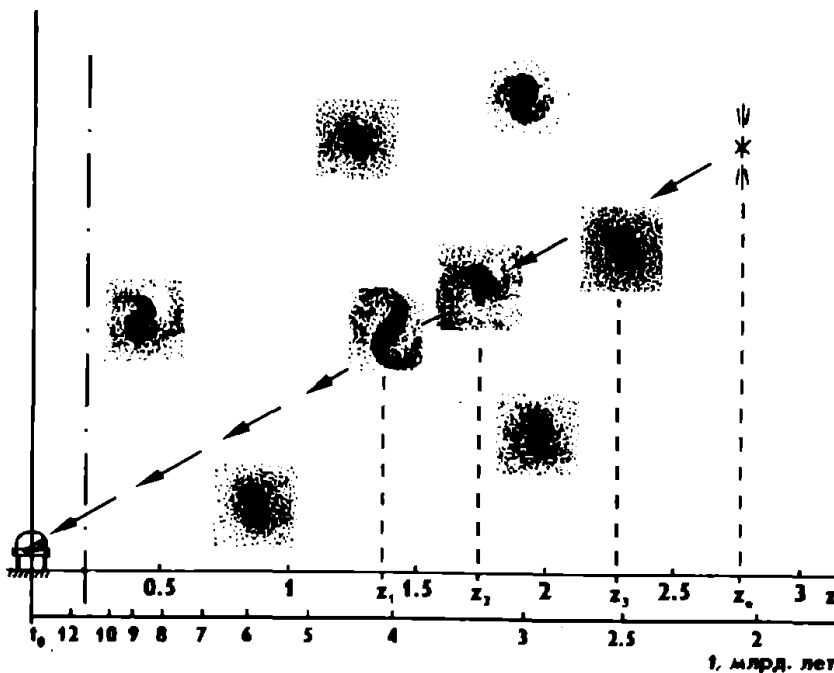
¹⁶ Sisterna P., Vucetich H. Time Variation of Fundamental Constants: Bounds from Geophysical and Astronomical Data // Phys. Rev. D. 1990. V. 41. P. 1034.

¹⁷ Marciano W. J. Time Variation of the Fundamental «Constants» and Kaluza — Klein Theories // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. P. 489.

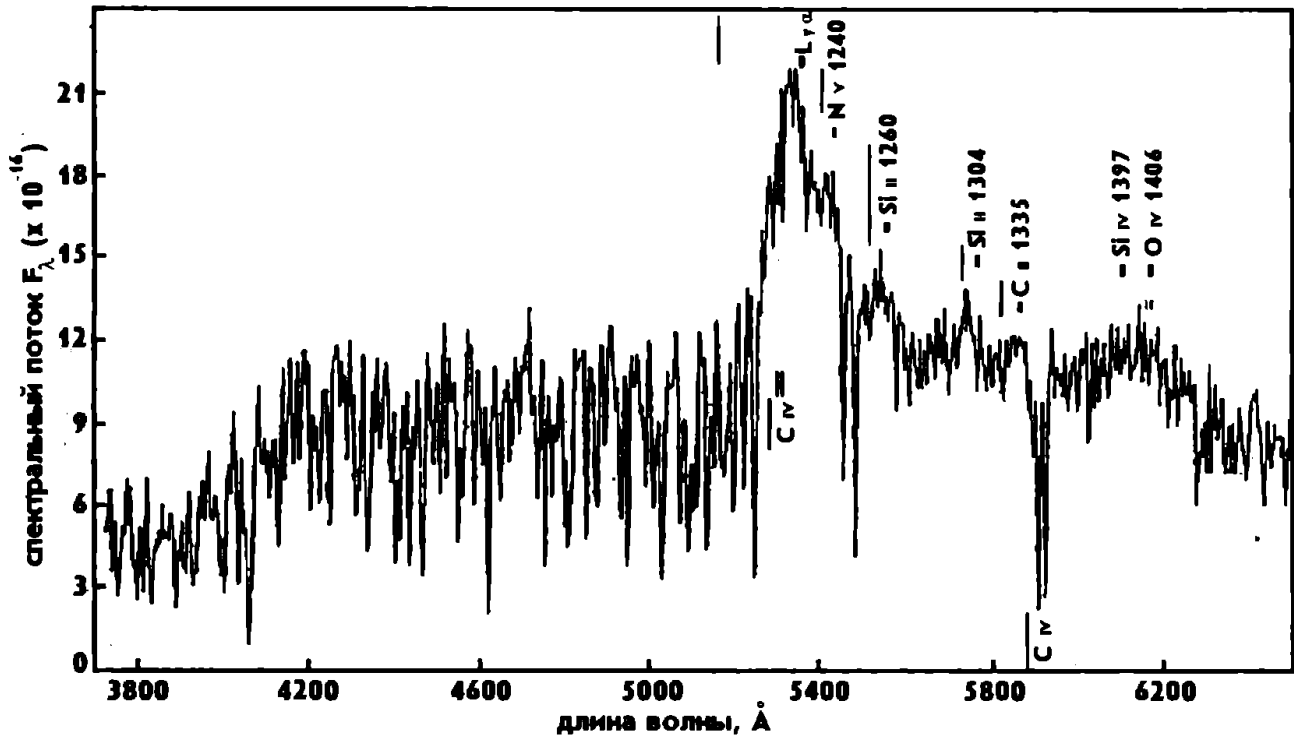


Квазар 3C 273. Радиоизображение на частоте 408 МГц (вверху) и оптическое изображение (негатив) на длине волны 4500 Å (внизу). Красное смещение этого квазара $z=0.158$. Это означает, что он удаляется от нас со скоростью 47 тыс. км/с и находится на расстоянии около 700 Мпк (или 2 млрд. св. лет). Следовательно, струя выброшенного газа, протянувшаяся на 10 — 20" дуги справа от квазара, находится от него на расстояниях не менее 30—70 кпк (для сравнения: 30 кпк — поперечник нашей Галактики).

расстояний 10—15 млрд. световых лет. Это означает, что свет от них по пути к Земле пересекал облака межзвездного газа в ранних галактиках и частично поглощался ими. Поэтому, анализируя спектры квазаров, можно получить уникальную информацию о ранних этапах эволюции Вселенной, о том периоде, когда наша Солнечная система еще не существовала.



Излучение квазара с большим красным смещением z_e . По пути к наблюдателю ($z=0$) оно пересекает облака межзвездного газа в галактиках и протогалактиках с красными смещениями z_1, z_2, z_3 , и линии поглощения газа впечатываются в спектр излучения квазара. Нижняя горизонтальная шкала показывает возраст Вселенной t на момент формирования спектральной линии. Вертикальная цветная линия отмечает время возникновения Солнечной системы, t_0 — настоящий момент.



Типичный спектр далекого квазара (S5 0014+813), снятый с разрешением 6 \AA на 6-метровом телескопе САО РАН в 1983 г. На фоне интенсивного континуума (непрерывной составляющей спектра излучения квазара) видны широкие ($\sim 100 \text{ \AA}$) линии излучения атомов водорода (L_{α}) и ионов NV, SiII, CII, SiIV, OIV с красным смещением $z=3.384$. Видны также многочисленные узкие линии поглощения, возникшие в межзвездном газе далеких галактик, оказавшихся на луче зрения. В частности, отмечены узкие дублетные линии поглощения иона CIV с длиной волны $\lambda_{\text{лаб.}}=5308$ и 5318 \AA ($z=2.429$) на фоне пика излучения L_{α} , а также глубокие линии того же иона с $\lambda_{\text{лаб.}}=5379$ и 5391 \AA ($z=2.798$) на фоне континуума. (Варшалович Д. А. и др. Спектральные исследования квазара S5 0014+81. Анализ эмиссионного спектра // Астрон. журн. 1987. Т. 64. С. 262.)

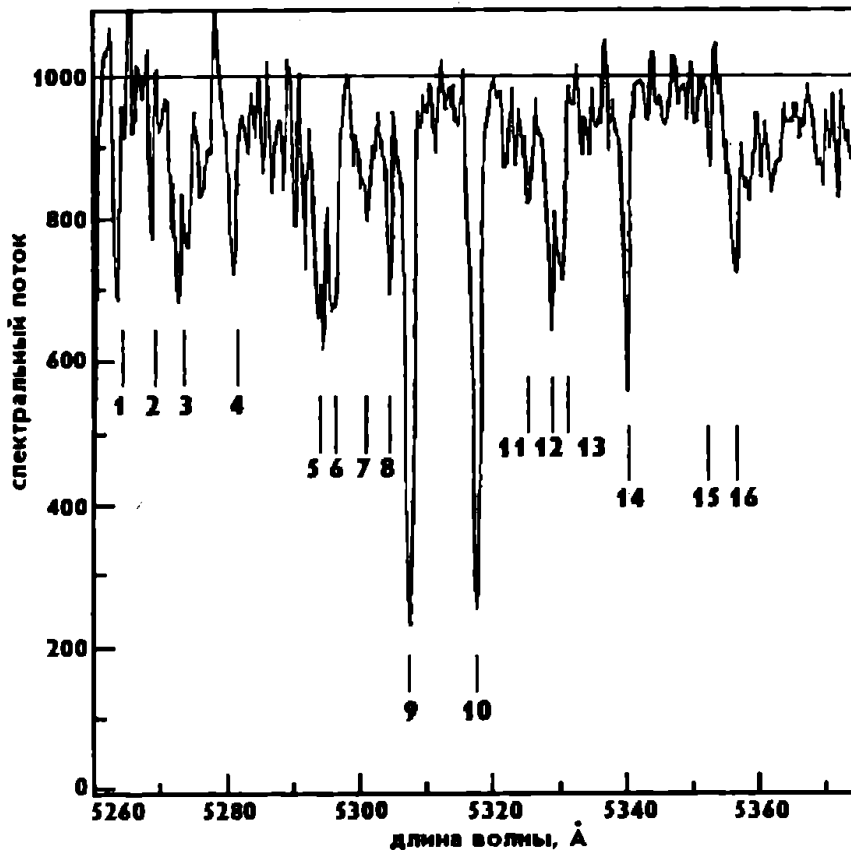
В типичном спектре далекого квазара, полученном на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН, присутствует мощная широкая линия излучения L_{α} атомарного водорода, а также — линии излучения четырехкратно ионизованного азота (спектроскопическое обозначение NV), однократно ионизованных кремния и углерода (SiII и CII), трехкратно ионизованных кремния

и кислорода (SiIV и OIV). В лабораторных условиях эти линии, расположенные в ультрафиолетовой части спектра, могут наблюдаться только на специальных экспериментальных установках.

Из-за расширения Вселенной далекие объекты удаляются от нас с большой скоростью, что благодаря эффекту Доплера приводит к сдвигу линий из ультрафиолетовой в видимую область спектра. Таким образом, длины волн наблюдаемых линий $\lambda_{\text{набл.}}$ увеличены по сравнению с их лабораторными значениями λ_0 в пропорции

$$\lambda_{\text{набл.}} = \lambda_0(1+z),$$

где величина z служит мерой космологического красного смещения. Изрезанность спектра объясняется не шумами, а присутствием многочисленных линий поглощения. Линии излучения квазара в обсуждаемом спектре соответствуют красному смещению $z=3.384$, а линии поглощения межзвездного газа (менее удаленного, чем сам квазар) — меньшим значениям z . По величине красного смещения z можно опреде-



Участок спектра квазара S5 0014+81, полученный в 1994 г. на 6-метровом телескопе САО РАН и включающий узкие дублетные линии CIV (9, 10), отмеченные на предыдущем рисунке (вверху). (Спектральный поток нормирован на уровень континуума.) Благодаря улучшенному разрешению (0.3 Å), контур каждой линии выписан более отчетливо. Кроме того, стали видны более слабые линии поглощения (1–8 и 11–16), которые не были заметны на предыдущем рисунке. Внизу показана схема радиационных переходов из основного состояния $S_{1/2}$ в возбужденные состояния $P_{1/2}$ и $P_{3/2}$. Более длинная стрелка соответствует большей частоте и, соответственно, меньшей длине волны. Толщина стрелки отвечает теоретической интенсивности поглощения. Относительное расщепление P-уровней пропорционально квадрату постоянной тонкой структуры α . Получение и обработка таких спектров трудоемка, но важная задача.

лить t — космологический возраст Вселенной в эпоху формирования спектральной линии. Согласно стандартной космологической модели,

$$t = t_0(1+z)^{-3/2},$$

где $t_0 = (15 \pm 5) \times 10^9$ лет — современный возраст Вселенной.

В дальнейшем нас будут интересовать главным образом не линии излучения самого квазара, а узкие абсорбционные линии, обусловленные поглощением в галактиках и протогалактиках, случайно оказавшихся на луче зрения. Например, в спектре, о котором речь шла выше, присутствуют две пары узких линий поглощения с

длинами волн $\lambda_{\text{набл.}} = 5308$ и 5318 Å, а также 5879 и 5891 Å, соответствующих ионам углерода CIV ($\lambda_0 = 1548$ и 1551 Å) в межзвездном газе, которые оказались на луче зрения галактик с $z = 2.429$ и $z = 2.798$. Значит, эти линии поглощения впечатались в спектр квазара, когда Вселенная была соответственно в 6.3 и 7.4 раза моложе, чем теперь. При этом мы используем излучение квазара лишь для просвечивания Вселенной, поэтому для нас несущественно, что природа самого квазара изучена еще недостаточно полно. Существенно, чтобы изучаемые линии были сняты с достаточно высоким спектральным разрешением и высоким отношением сигнала к шуму.

ИЗМЕНЯЕТСЯ ЛИ ПОСТОЯННАЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ?

Название «постоянная тонкой структуры», введенное Зоммерфельдом в 1916 г. для обозначения величины $\alpha = e^2/\hbar c$, связано с тем, что она определяет тонкое расщепление энергетических уровней атомов. Позднее выяснилось, что она имеет гораздо более фундаментальное значение, являясь единственным параметром квантовой электродинамики и, таким образом, одним из ключевых параметров физики.

Чтобы выяснить, не изменилось ли значение α за космологическое время, целесообразно исследовать тонкое расщепление дублетных линий литие- и натриеподобных ионов LiV , MgII и других, которые отвечают переходам $S_{1/2} \rightarrow P_{3/2}$, $S_{1/2} \rightarrow P_{1/2}$ и часто наблюдаются в спектрах далеких квазаров.

Согласно квантовой электродинамике, относительная величина расщепления этих линий

$$\Delta\lambda/\lambda = \lambda_2/\lambda_1 - 1$$

пропорциональна α^2 (с точностью до пренебрежимо малых поправок). Следовательно, если значение α изменялось со временем, то относительное расщепление $\Delta\lambda/\lambda$ должно зависеть от величины красного смещения.

Первые измерения не обнаружили такой зависимости¹⁸. Были получены ограничения на возможные отклонения $\Delta\alpha$ постоянной тонкой структуры от ее современного значения, соответствующие верхнему пределу $|\Delta\alpha/\alpha| < 0.1$ при $z=2$. Однако позже, на основе анализа 36 специально отобранных спектральных систем высокого качества, была получена оценка $\Delta\alpha/\alpha = 0.03 \pm 0.01$ для эпохи $z=2$, как будто бы указывавшая

на изменение постоянной тонкой структуры со временем¹⁹. Это побудило нас предпринять новое, более тщательное исследование²⁰.

Были заново проанализированы все опубликованные данные о дублетных линиях, наблюдавшихся в спектрах квазаров, и составлен специальный каталог длин волн этих линий. В итоге рассмотрено около полутора тысяч пар дублетных линий литие- и натриеподобных ионов углерода, азота, кислорода, магния, алюминия и кремния с красными смещениями от 0.2 до 3.6. Подавляющая часть этих данных имеет не столь высокое качество, как предыдущая выборка. Однако большой объем данных, а также использование робастных методов статистического анализа позволили достичь более высокой точности определения тонкого расщепления.

Проведенный анализ показал отсутствие статистически значимого отклонения отношения $\Delta\lambda/\lambda$ в эпохи, соответствующие красным смещениям $z \leq 3.6$, от современного значения (при $z=0$). Для этих эпох, охватывающих 90 % времени существования Вселенной, получен ряд ограничений на различные возможные зависимости постоянной тонкой структуры α от космологического времени t . В частности, показано, что в течение всего этого периода средняя скорость относительного изменения α не превосходит²¹.

$$\left| \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right| < \frac{10^{-13}}{\text{год}}.$$

В результате дополнительного анализа выяснилось, что некоторые из

20 Potekhin A. Y., Varshalovich D. A. Non-Variability of the Fine-Structure Constant over Cosmological Time Scales // *Astronomy and Astrophys. Suppl. Ser.* 1994. V. 104. P. 89; Варшалович Д. А., Потехин А. Ю. Проверка возможного космологического изменения постоянной тонкой структуры на основе анализа спектра квазаров // *Письма в Астрон. журн.* 1994. Т. 20. № 12. С. 883.

21 Здесь и далее все полученные нами верхние пределы приводятся для уровня статистической значимости в три стандартных отклонения (что для нормального распределения ошибок соответствует доверительной вероятности 99.7 %).

¹⁸ См., например: Bahcall J., Schmidt M. Op. cit.

¹⁹ Levshakov S. A. On Cosmic Time Variability of the Fine-Structure Constant // *Vistas Astron.* 1993. V. 37. P. 535.

теоретических моделей противоречат наблюдениям. Например, степенные зависимости вида t^n могут быть согласованы с наблюдениями только при условии $|n| < 0.002$. Это неравенство отсекает широкий класс теоретических моделей. В частности, оно противоречит гипотезе Гамова, согласно которой должно быть $n=1$, а также зависимостям с $n=1$, $-1/4$ и $-4/3$, предлагавшимся разными авторами в 1980-е годы на основе моделей типа Калуцы — Клейна. Оказалось, что гипотеза Теллера о логарифмической зависимости тоже должна быть отвергнута.

Кроме того, богатый наблюдательный материал, собранный в нашем каталоге длин волн дублетных линий, позволил проанализировать также возможность различий в значениях α в причинно не связанных между собой областях Вселенной. Дело в том, что многие области формирования спектральных линий, наблюдаемых теперь с большими красными смещениями в разных направлениях на небесной сфере, были причинно не связаны между собой в те эпохи, когда эти линии образовывались. Другими словами, никакая информация не могла быть передана из какой-либо точки Вселенной в две такие области со скоростью, не превышавшей скорость света. В принципе, в причинно не связанных областях Вселенной фундаментальные константы могли бы быть разными. Однако оказалось, что зависимость величины тонкого дублетного расщепления (а значит, и параметра α) от направления на небесной сфере укладывается в рамки статистической погрешности: $|\Delta\alpha/\alpha| < 3 \times 10^{-4}$.

ИЗМЕНЯЕТСЯ ЛИ ОТНОШЕНИЕ МАСС ПРОТОНА И ЭЛЕКТРОНА?

Безразмерная постоянная $\mu = m_p/m_e$ (см. табл. 2) приближенно равна отношению констант сильного ядерного взаимодействия $(g^2/\hbar c) \sim 14$ и электромагнитного взаимодействия $\alpha \approx 1/137$. Здесь g — эффективная константа связи, которая вычисляется

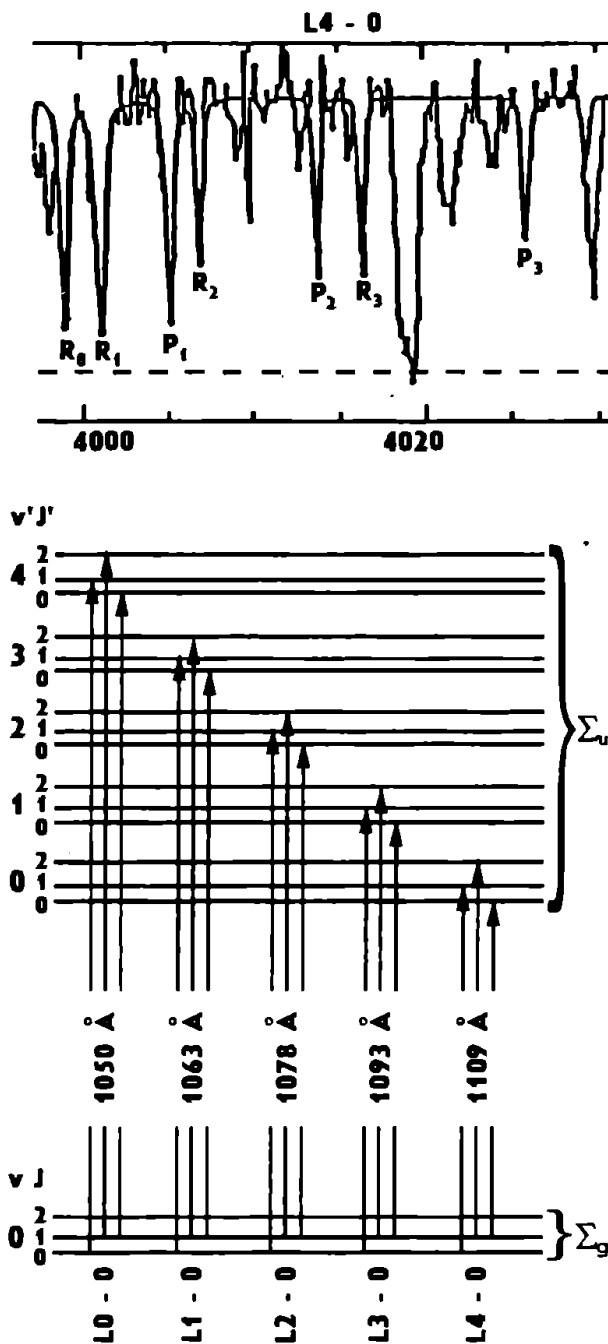
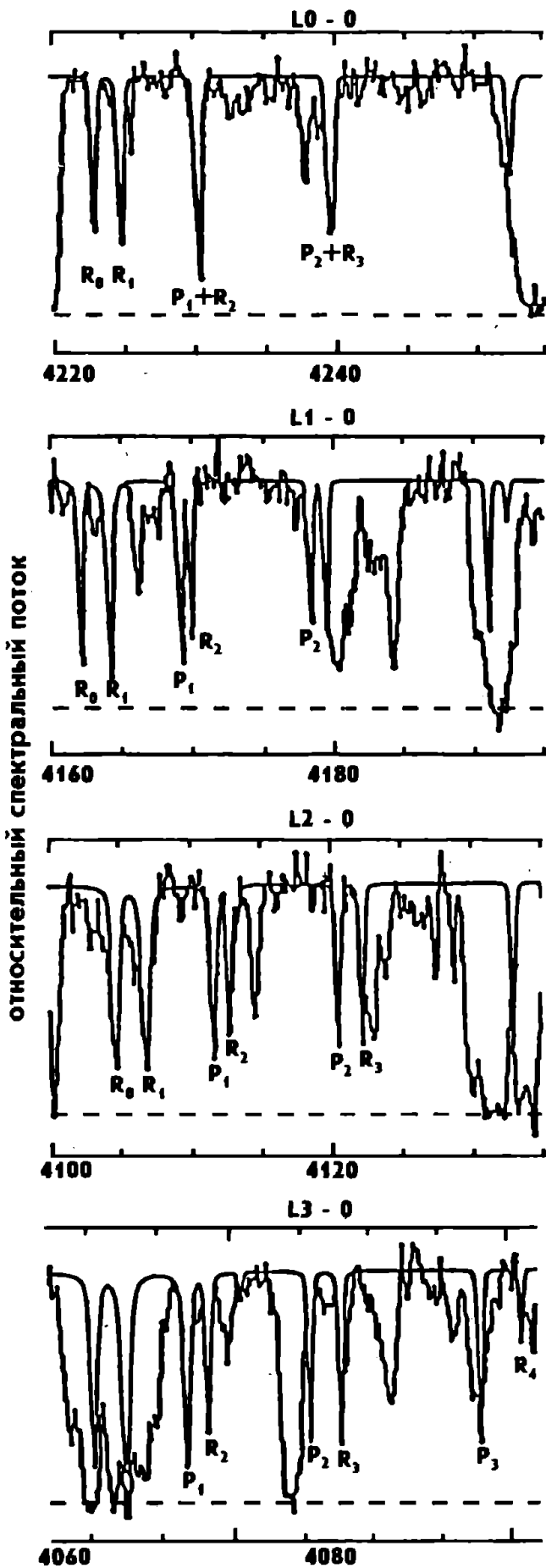
из амплитуды рассеяния π -мезонов на нуклонах.

Параметр μ играет важную роль в молекулярной спектроскопии, поскольку он наряду с параметром $\nu = m_p/m_e$ определяет приведенную массу молекулы M в атомной системе единиц (в которой m_e служит единицей массы). Величину $1/\sqrt{M}$ используют в качестве малого параметра разложения при вычислении энергий молекул. Энергия каждой молекулы складывается из энергии электронов в поле ядер, энергии колебаний этих ядер друг относительно друга и энергии вращения молекулы как целого. Как показали М. Борн и Р. Оппенгеймер, энергия электронного возбуждения молекулы в первом приближении не зависит от ее массы M , тогда как энергия колебательного возбуждения пропорциональна $M^{-1/2}$, а энергия вращательного возбуждения пропорциональна M^{-1} . На этом основана классификация всех молекулярных спектров.

Чтобы выяснить, не изменилось ли значение μ за космологическое время, можно использовать линии поглощения молекулярного водорода в спектрах квазаров. Поскольку ядро атома водорода есть не что иное как протон, параметр μ прямо пропорционален приведенной массе молекулы H_2 . Изменение μ можно обнаружить, сравнивая длины волн различных электронно-колебательно-вращательных линий в спектре квазара и в лабораторном спектре. Существенно, что длины волн различных линий по-разному зависят от изучаемого параметра. Это позволяет отделить космологическое красное смещение от смещения, обусловленного изменением μ .

В настоящее время единственная надежно отождествленная система оптических молекулярных линий с большим красным смещением — это система поглощения H_2 с $z=2.8108$, обнаруженная 10 лет назад²² в спектре

²² Levshakov S. A., Varshalovich D. A. Molecular Hydrogen in the $z=2.811$ Absorbing Material Toward the Quasar PKS 0528—250 // Monthly Not. Roy. Astr. Soc. 1985. V. 212. P. 517.



Спектр квазара PKS 0528-250, недавно полученный на 4-метровом телескопе Межамериканской обсерватории Серро-Тололо. В нем наблюдаются линии поглощения, соответствующие переходам молекулы H₂ из нижнего состояния Σ_g, характеризуемого колебательным квантовым числом $\nu=0$ и вращательным квантовым числом J , в верхнее состояние Σ_u с колебательным и вращательным квантовыми числами ν' и J' ; красное смещение $z=2.8108$. Эти линии группируются в полосы, обозначаемые $L\nu'-\nu$. Квантовые правила отбора допускают переходы, при которых $J' = J+1$ (спектроскопическое обозначение R_J) и $J' = J-1$ (спектроскопическое обозначение P_J). Показаны участки спектра, на которых присутствуют линии от L0-0 до L4-0. На диаграмме энергетических уровней стрелками изображены переходы R₀, R₁ и P₁.

квазара PKS 0528—250. Мы вычислили коэффициенты чувствительности длин волн H_2 по отношению к возможному изменению параметра μ и проанализировали наблюдательные данные, используя спектр PKS 0528—250, снятый с наилучшим на сегодняшний день разрешением²³. В результате проведенного анализа не обнаружено изменения отношения масс протона и электрона. Получено ограничение на возможное отклонение ($\Delta\mu$) параметра μ от его современного значения:

$$|\Delta\mu/\mu| < 2 \times 10^{-4} \text{ при } z=2.8108.$$

В рамках стандартной космологической модели это соответствует ограничению скорости относительного изменения массы протона (в атомных единицах) на уровне $\sim 2 \times 10^{-14}$ в год.

ИЗМЕНЯЕТСЯ ЛИ ОТНОШЕНИЕ СУММЫ МАСС НУКЛЕОНОВ К МАССЕ ЭЛЕКТРОНА?

В то время как спектр молекулы H_2 дает нам информацию об отношении масс протона и электрона в далеком прошлом, по спектрам более тяжелых молекул можно судить также и о массе нейтрона. К сожалению, пока не найдены оптические линии таких молекул при больших красных смещениях. Однако в последние годы на радиотелескопах наблюдалось несколько линий излучения молекулы CO в микроволновом диапазоне, красное смещение которых практически совпало с ранее измеренным (вдоль того же луча зрения) красным смещением оптических линий атомарных ионов. Естественно предположить, что излучение CO идет из той же галактики, которой принадлежат облака этих ионов. Это предположение подкрепляется сравнением измеренных характе-

ристик линий (их ширины и интенсивностей). Оптические линии ионов отвечают их электронным переходам, а радиолнии CO — переходам между разными вращательными состояниями молекулы. Как отмечалось выше, электронная энергия практически не зависит от массы ядра, а вращательная пропорциональна M^{-1} (в атомных единицах). Следовательно, красные смещения длин волн в оптическом и микроволновом диапазонах не совпадали бы, если бы значение приведенной массы молекулы M (по отношению к массе электрона m_e) в эпоху формирования спектральной линии отличалось от современного. Таким образом, сравнение длин волн атомарных ионов и молекул CO в спектрах далеких объектов дает информацию о том, какова была масса молекулы миллиарды лет назад. С достаточно хорошей точностью можно считать, что масса молекулы $^{12}C^{16}O$ (а именно ее радиолнии и были зарегистрированы) прямо пропорциональна сумме масс протона m_p и нейтрона m_n , а значит, анализируя эти данные, мы можем получить информацию об отношении $\mu + v = (m_p + m_n)/m_e$ в раннюю космологическую эпоху.

Чтобы определить искомое отношение масс с высокой точностью, следует использовать достаточно узкие спектральные линии. Мы рассмотрели две спектральные системы²⁴. Первая из них относится к замечательному астрономическому объекту — галактике IRAS F10214+4724, впервые открытой как яркий источник инфракрасного излучения в ходе наблюдений на космическом телескопе ИРАС²⁵. В наземных оптических наблюдениях 1991 г. этот источник был отождествлен с галактикой, в спектре которой присутствуют эмиссионные линии ионов с красным смещением $z=2.286 \pm 0.001$

²³ Lanzetta K. M., Baldwin J. A., Potekhin A. Y., Varshalovich D. A., Williger G. M., Carswell R. F. An Observation Limit to Cosmological Variation of the Proton-to-Electron Mass Ratio // 17th Texas Symp. Relativ. Astrophys., Garching bei München, 12—16 Dec., 1994. Proceedings. Garching, 1995.

²⁴ Varshalovich D. A., Potekhin A. Y. Cosmological Variability of Fundamental Physical Constants // Space Sci. Rev. 1995 (принято к публикации).

²⁵ Об этих наблюдениях см.: Соифер Б. Т. Инфракрасная Вселенная «ИРАС» // Природа. 1991. № 8. С. 34.

(погрешность обусловлена шириной этих линий), и в том же году была открыта²⁶ радиолиния этой галактики, отвечающая вращательному переходу CO ($J=3 \rightarrow 2$, где J — вращательное квантовое число), с красным смещением $z=2.2862 \pm 0.0006$. Из этих данных следует, что сумма масс нуклонов при $z=2.286$ не могла отличаться от современного значения более чем на 0.15 %.

Другое наблюдение относится к системе линий поглощения ионов с красным смещением $z=1.944$ в спектре квазара PKS 1157+014. Недавно в ней была зарегистрирована²⁷ вращательная радиолиния излучения CO ($J=2 \rightarrow 1$). Узость спектральных линий в этой системе позволяет вывести значительно более жесткое ограничение на возможное отличие суммы масс нуклонов от современного значения:

$$|(\Delta\mu + \Delta\nu)/(\mu + \nu)| < 4 \times 10^{-4} \text{ при } z=1.944.$$

Таким образом, не только масса протона, но и сумма масс обоих нуклонов не могла отличаться от современного значения более чем на 0.04 % в эпоху, когда Вселенная была в шесть раз моложе, чем теперь.

ВЫВОДЫ

Современные физические теории рисуют разные картины ранней Вселенной, и чтобы выбрать верную из них, необходимо сравнение с наблюдениями. Описанные в этой статье результаты служат одним из примеров того, как спектры квазаров помогают нам понять, что представляла собой Вселенная в ранние космологические эпохи.

Так, анализ спектров квазаров позволяет установить жесткие верхние пределы на возможное изменение константы электромагнитного взаимо-

действия, а также отношений масс протона и нейтрона к массе электрона. Последние две величины могли бы меняться, если бы претерпевали изменения константы сильного и слабого взаимодействия. Однако оказалось, что за 10^{10} лет, прошедших со времени формирования спектров далеких квазаров, эти константы в пределах статистической погрешности не изменялись. Найденные верхние пределы ограничивают среднюю скорость возможного изменения рассмотренных параметров на уровне $\sim 10^{-13}$ в год за период, охватывающий 80—90 % времени существования Вселенной. Эти данные служат эффективными критериями отбора допустимых теоретических моделей элементарных взаимодействий, предсказывающих изменения физических постоянных на космологической шкале времени. Впервые удалось показать, что гипотеза Теллера — Дайсона о логарифмической зависимости постоянной тонкой структуры α от времени не соответствует наблюдательным данным.

Кроме того, значения фундаментальной постоянной α оказались одинаковыми (в пределах статистической погрешности 0.3 %) в областях Вселенной, которые не были причинно связаны в период формирования спектров. Этот факт можно рассматривать как аргумент, свидетельствующий в пользу так называемой инфляционной космологической модели²⁸, предполагающей общее сверхбыстрое раздувание Вселенной по экспоненциальному закону на самой ранней стадии космологической эволюции.

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Международного научного фонда.

²⁶ Brown R. L., Van den Bout P. A. CO Emission at $z = 2.2867$ in the Galaxy IRAS F10214+4724 // Astron. J. 1991. V. 102. P. 1956.

²⁷ Вальц И. Е. и др. Поиски молекулярных линий в направлении на квазары // Астрон. журн. 1993. Т. 70. С. 667.

²⁸ Зельдович Я. Б. Современная космология // Природа. 1983. № 9. С. 11; Зельдович Я. Б. Почему расширяется Вселенная // Природа. 1984. № 2. С. 66.