

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

(31 марта 1993 г.)

31 марта 1993 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. Д.А. Варшалович, С.А. Левшаков, А.Ю. Потехин. Проверка неизменности фундаментальных констант за космологическое время.

2. М.И. Пудовкин, О.М. Распопов. Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат.

Краткое содержание докладов публикуется далее.

Д.А. Варшалович, С.А. Левшаков, А.Ю. Потехин. Проверка неизменности фундаментальных констант за космологическое время. Квазары — самые мощные источники энергии во Вселенной. Светимость их может достигать 10^{42} Вт. Поэтому они видны дальше, чем любые другие объекты, — вплоть до расстояний 10 — 15 млрд. световых лет. Но это означает, что их спектры сформировались задолго до образования Солнечной системы, возраст которой оценивается в 4,5 млрд. лет. Поэтому, исследуя спектры далеких квазаров, можно получить уникальную информацию о ранних этапах эволюции Вселенной, о составе вещества и физических условиях, имевших место в ту далекую эпоху. В частности, исследование этих спектров позволяет проверить, не изменились ли за космологическое время значения фундаментальных физических констант.

Проблема возможного непостоянства фундаментальных "постоянных" была теоретически сформулирована Дираком [1] в 1937 г. Впоследствии ее рассматривали Теллер [2], Ландау [3], Бранс и Дикке [4], Де Витт [5], Гамов [6] и Дайсон [7]. Хотя в исходном виде гипотеза Дирака не подтвердилась [7], интерес к данной проблеме вновь усилился в 80-е годы, когда выяснилось, что такие теории "Великого объединения" взаимодействий, как модели Калуцы — Клейна [8—11] или "суперструн" [12],

приводят к космологическому изменению параметров взаимодействий. Современное изложение этого вопроса можно найти в статье Окуня [13]. Таким образом, сам факт неизменности фундаментальных констант является нетривиальным и нуждается в экспериментальной проверке.

Следует отметить, что в настоящее время константы взаимодействий определены с относительной погрешностью порядка 10^{-3} , что исключает их значительную вариацию за небольшой период времени, но не исключено их изменение за космологическое время. Верхние пределы такого изменения служат важным критерием отбора допустимых теоретических моделей элементарных взаимодействий.

С целью выяснения возможной зависимости физических констант от времени было выполнено несколько лабораторных исследований, основанных на сравнении стандартов частоты, использующих различные физические явления. Во-первых, сравнение радиочастот водородного мазера и цезиевого стандарта дало для отношения гиромангнитных факторов цезия и водорода $R_1 = g(\text{Cs})/g(\text{H})$ верхнюю оценку относительной скорости изменения $|\dot{R}_1/R_1| < 10^{-13}$ год⁻¹ [14]. Во-вторых, сравнение частот высокочастотных сверхпроводящих резонаторов с цезиевым стандартом дало ограничение $|\dot{R}_2/R_2| < 4,1 \cdot 10^{-12}$ год⁻¹ для комбинации $R_2 = \alpha^3 g(\text{Cs}) m_e/m_p$, где α — постоянная тонкой структуры, а m_e и m_p — массы электрона и протона.

Некоторое время назад появилось сообщение об изменении отношения частот квантовых стандартов оптического и радиодиапазонов [15]. Авторы предположительно интерпретировали свой результат как следствие векового изменения комбинации $R_3 = \alpha^2 g(\text{Cs}) (m_e/m_p)^{1/2}$. По их оценкам $\dot{R}_3/R_3 = (1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-11}$ год⁻¹, что соответствует гипотезе Дирака. Этот результат вызвал дискуссию [16]. Ниже будет показано, что такая интерпретация не согласуется с астрофизическими наблюдениями.

Ограничения скорости изменения различных

комбинаций фундаментальных констант выводились рядом авторов также из геофизических, геохимических и палеонтологических данных, хотя большинство этих ограничений является косвенными и модельно-зависимыми (например, феномен Окло [17]). Проанализировав большое число таких работ, Систерна и Вучетич [18] вывели обобщающие ограничения на возможные скорости изменения физических констант в эпоху существования Солнечной системы. Однако эти результаты нельзя экстраполировать на более ранние стадии развития Вселенной, поскольку теоретически допускаются различные законы изменения фундаментальных констант.

Данная проблема может быть решена астрофизическими методами. Хотя точность астрономических измерений ниже, чем точность прецизионных лабораторных измерений, большой интервал времени $\sim 10^{10}$ лет позволяет получить более жесткие оценки для скорости возможного изменения фундаментальных констант.

В спектрах квазаров длины волн линий увеличены в результате космологического красного смещения, $\lambda_{\text{набл}} = \lambda_{\text{лаб}} (1 + z)$. Наблюдаются системы линий с красным смещением вплоть до $z = 4,92$. Но при этом отношения длин волн разных линий должны оставаться неизменными, если энергии соответствующих уровней атомов, молекул и ионов в эпоху формирования спектра были такими же, как и в настоящее время. Поэтому, сравнивая величины красных смещений z разных линий, принадлежащих к одной и той же спектральной системе, можно либо обнаружить изменение физических констант, либо установить верхний предел их возможного изменения. Впервые этот метод был предложен и использован Саведовым [19].

В работах [20–23] сравнивались красные смещения оптических и радиолний в квазарных абсорбционных системах. Для изменения величины $R_4 = \alpha^2 g(H) m_e / m_p$ был получен верхний предел $|\dot{R}_4 / R_4| \lesssim 10^{-15} \text{ год}^{-1}$. Однако эту оценку нельзя считать надежной из-за возможных систематических ошибок, связанных с пространственным несовпадением областей, излучающих в оптическом и радиодиапазоне.

От этого недостатка свободен метод, основанный на измерении тонкого расщепления мультиплетов. Относительная величина этого расщепления пропорциональна $R_5 = \alpha^2$. Сопоставляя эти величины при различных красных смещениях, можно исследовать возможное изменение постоянной тонкой структуры α со временем.

Данный метод наиболее перспективен применительно к линиям поглощения литие- и натриеподобных ионов, отвечающих переходам ${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ и ${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$, которые часто наблюдаются в спектрах квазаров. Во-первых, переходы происходят с одного и того же уровня. Во-вторых,

линии поглощения обычно узкие, так что их длины волн можно определить точнее, чем положение линий излучения, ширины которых в десятки раз больше.

Из измерений тонкого расщепления линий в спектрах квазаров в работах [20, 24, 25] были получены оценки, дающие ограничение $|\dot{\alpha} / \alpha| \lesssim 4 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}$. В указанных работах использовалось небольшое число наблюдений. Значительно более точные и надежные оценки могли бы быть получены при статистическом анализе наблюдений разных абсорбционных систем. Это стало возможным в последние годы, когда было выполнено большое число высококачественных спектральных исследований квазаров.

Впервые попытка такого анализа была предпринята в работе [26]. На основе 500 пар дублетных линий LiI-, NaI- и KI-подобных ионов, полученных с разрешением лучше 2Å , оценивалась величина $\Delta\alpha / \alpha$ при $z \sim 2$. Здесь $\Delta\alpha \equiv \alpha_z - \alpha_0$ есть разность значений постоянной тонкой структуры в эпоху, соответствующую космологическому красному смещению z , и в современную эпоху). Сообщалось, что $\Delta\alpha / \alpha = (2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$. Однако из-за некорректного вычисления ошибок оцененное среднеквадратичное отклонение оказалось примерно в шесть раз меньше истинного. Кроме того, данное исследование не включало анализа селективных эффектов, которые могли бы существенно исказить распределение величины α_z / α_0 . Чтобы минимизировать такие эффекты, был произведен отбор 36 наиболее надежных дублетов (узких, изолированных и достаточно сильных), что привело к оценке $\Delta\alpha / \alpha = (3 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ при $z \approx 2$ [27]. Явная несогласованность этих оценок указывает на неоднородность исходной выборки. При работе с однородными данными, как показано в [28], распределение величин α_z / α_0 будет приблизительно гауссовым, причем их выборочное среднее, как правило, оказывается сдвинутым, что является следствием нелинейной зависимости отношения α_z / α_0 от длин волн. Величина сдвига зависит от качества спектральных данных и лежит в диапазоне от $-0,01\%$ до $-1,5\%$, если величина $\sigma_\lambda / (\Delta\lambda)_z$ (где $(\Delta\lambda)_z = (\Delta\lambda)_0 (1 + z)$ — наблюдаемая величина тонкого расщепления, а σ_λ — среднеквадратическая ошибка определения истинного положения спектральной линии) составляет от 5 до 25% соответственно.

В работах [29, 30] проведена обработка большого массива неоднородных данных (с негауссовым распределением ошибок) — более 1000 пар линий ионов CIV, NV, OVI, MgII, AlIII и SiIV с красными смещениями $z = 0,2-3,7$. Подавляющая их часть имеет не столь хорошее качество, как выборка из работы [27], однако большой объем данных позволил получить более узкие пределы возможного изменения α . Неоднородные данные целесообразно анализировать робастными метода-

ми [31]. В работах [29, 30] применялся робастный линейный регрессионный анализ по методу "усеченного среднего" [32]. Было показано, что такой анализ позволяет примерно вдвое сузить оценочные доверительные интервалы, а также на порядок уменьшить систематический сдвиг, связанный с нелинейной зависимостью α_z/α_0 от λ . Данные по каждому из шести ионов обрабатывались отдельно. Для контроля влияния качества данных анализировались подвыборки линий с разным спектральным разрешением. Применимость линейной регрессионной модели проверялась на основе раздельного анализа данных из разных интервалов красных смещений.

Проведенный анализ показал отсутствие статистически значимого изменения α . Получена оценка $\alpha^{-1}d\alpha/dz = (-0,6 \pm 2,8) \cdot 10^{-4}$. В пересчете на современную эпоху это дает $|\dot{\alpha}/\alpha| < 4 \cdot 10^{-14}$ год⁻¹ (на уровне значимости 95%). Хотя это ограничение слабее предела $|\dot{\alpha}/\alpha| < 1,4 \cdot 10^{-15}$ год⁻¹, приведенного в [18], оно имеет независимое значение, так как относится к более ранней космологической эпохе (вплоть до $z \sim 3$) и к более далеким областям Вселенной, которые не были причинно связаны в эпоху формирования наблюдаемых спектров.

Независимый интерес представляют также оценки возможного изменения с космологическим временем отношения массы электрона к массе протона $R_6 = m_e/m_p$, основанные на анализе электронно-колебательно-вращательных спектров поглощения молекулы H_2 . Впервые на возможность таких измерений по спектрам внегалактических объектов указал Томпсон [33]. В настоящее время известна одна надежно установленная система линий поглощения N_2 лаймановских и вернеровских полос, обнаруженная при $z = 2,811$ в спектре квазара PKS 0528—250 [34, 35]. Предварительная оценка [35] давала ограничение $|\Delta R_6/R_6| < 2 \cdot 10^{-4}$. Однако более детальный анализ этих данных, проделанный в работе [36], привел к величине $|\Delta R_6/R_6| < 2 \cdot 10^{-3}$, что соответствует $|\dot{R}_6/R_6| \lesssim 10^{-13}$ год⁻¹.

Таким образом, для космологической эпохи, соответствующей красному смещению $z \approx 3$ (10—15 млрд. лет назад), нами впервые получены оценки верхних пределов относительного изменения постоянной тонкой структуры, $|\Delta\alpha/\alpha| < 0,2\%$, и отношения массы электрона к массе протона, $|\Delta(m_e/m_p)/(m_e/m_p)| < 0,2\%$ (на уровне статистической значимости 95%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dirac P.A.M. Nature. 1937, 139, 323.
2. Teller E. Phys. Rev. 1948, 73, 801.
3. Landau L.D. On the quantum theory of fields. — Niels Bohr and the Development of Physics. Ed. W. Pauli. London: Pergamon Press, 1955.
4. Brans C., Dicke R.H. Phys. Rev. 1961, 124, 925.
5. De Witt B.S. Phys. Rev. Lett. 1964, 13, 114.
6. Gamow G. Phys. Rev. Lett. 1967, 19, 759.
7. Dyson F.J. The fundamental constants and their time variation. — Aspects of Quantum Theory. Eds. A. Salam, E.P. Wigner. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1972.
8. Chodos A., Detweiler S. Phys. Rev. 1980, D21, 2167.
9. Bekenstein J.D. Phys. Rev. 1982, D25, 1527.
10. Fremd P. Nucl. Phys. 1982, B209, 146.
11. Marciano W.J. Phys. Rev. Lett. 1984, 52, 459.
12. Wu Y., Wang Z. Phys. Rev. Lett. 1986, 57, 1978.
13. Окунь Л.Б. УФН. 1991, 161: № 9, 177.
14. Hellwig H. Proc. of the 28th Annual Symposium on Frequency Control. Washington: Electronic Industries Ass., 1974. P. 315.
15. Домнин Ю.С., Малимон А.Н., Татаренков В.М., Шумяцкий П.С. Письма ЖЭТФ. 1986, 43: № 4, 167.
16. Бугаев С.Р., Клементьев В.М., Чеботаев В.П. Письма ЖЭТФ. 1987, 45: № 2, 67.
17. Shlyakhter A. Nature. 1976, 264, 340.
18. Sisterna P., Vucetich H. Phys. Rev. 1990, D41, 1034.
19. Savedoff M.P. Nature. 1956, 178, 688.
20. Wolfe A.M., Brown R.L., Roberts M.S. Phys. Rev. Lett. 1976, 37, 179.
21. Wolfe A.M., Davis M.M. Astron. J. 1979, 84, 699.
22. Tubbs A.D., Wolfe A.M. Astrophys. J. Lett. 1980, 236, 105.
23. Briggs F.H., Wolfe A.M., Liszt H.S. Astrophys. J. 1989, 341, 650.
24. Bahcall J.N., Sargent W.L.W., Schmidt M. Astrophys. J. Lett. 1967, 149, 11.
25. Bahcall J.N., Schmidt M. Phys. Rev. Lett. 1967, 19, 1294.
26. Levshakov S.A. ESO Conf. Proc. 1992, 40, 139.
27. Levshakov S.A. Proc. of Symposium on Quantum Physics and the Universe, Tokyo, Aug. 19—22, 1992 (in press).
28. Левшаков С.А. Астрон. ж. 1993 (направлено в печать).
29. Потехин А.Ю., Варшалович Д.А. Препринт ФТИ РАН № 1590. С-Петербург, 1992.
30. Potekhin A.Yu., Varshalovich D.A. Astron. and Astrophys. 1993 (submitted).
31. Леман Э. Теория точечного оценивания. М.: Наука, 1991.
32. Ruppert D., Carroll P. J. Am. Stat. Ass. 1980, 75, 828.
33. Thompson R.I. Astrophys. Lett. 1975, 16, 3.
34. Levshakov S.A., Varshalovich D.A. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. (London). 1985, 212, 517.
35. Foltz C.B., Chaffee F.H., Black J.H. Astrophys. J. 1988, 324, 267.
36. Варшалович Д.А., Левшаков С.А. Письма ЖЭТФ. 1993 (направлено в печать).

М.И. Пудовкин, О.М. Распопов. Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат.

1. Известно, что солнечная активность и обусловленные ею возмущения межпланетной среды влияют на самые разнообразные процессы во всех оболочках Земли, включая магнитосферу, атмосферу, литосферу и биосферу. На факт воздействия солнечных вспышек на состояние нижней атмосферы обратил внимание в 1882 г. Г. Вильд [1]. С тех пор опубликованы сотни работ, в которых обсуждаются различные проявления солнечной активности в вариациях погоды и климата Земли, в изменении климата Земли, в изменении параметров нижней атмосферы. Однако в ряде работ, например в [2], указанные работы подвергаются критике.

Основным аргументом противников воздействия солнечной активности на метеопараметры являются возражения энергетического плана. Атмосферные процессы характеризуются мощностью порядка 10^{26} — 10^{27} эрг/день. В то же время поступление энергии из солнечного ветра в магнитосферу и