

В сентябре–октябре 1998 года Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН проводил международную научную конференцию под девизом "Физика на пороге XXI века", посвященную 80-летию со дня основания института. Значительная часть этого номера (до * * *) отведена публикации докладов на этой конференции.

01
Фундаментальные физические константы: одинаковы ли их значения в различных областях пространства–времени?

© Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик, А.Ю. Потехин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 14 января 1999 г.)

На основе анализа спектров квазаров получены наиболее надежные ограничения на возможное изменение постоянной тонкой структуры α и отношения массы протона к массе электрона μ в ходе космологической эволюции от эпохи, соответствующей космологическому красному смещению $z \approx 2.8$ (т.е. $\sim 10^{10}$ лет назад), до современной эпохи ($z=0$): $|\dot{\alpha}/\alpha| < 2 \cdot 10^{-14} \text{ yr}^{-1}$ и $|\dot{\mu}/\mu| < 2 \cdot 10^{-14} \text{ yr}^{-1}$.

1. Введение

Известно, что константы, характеризующие различные взаимодействия, связаны между собой и зависят от энергии взаимодействия [1]. Однако эта зависимость проявляется лишь при очень высоких энергиях (сотни MeV и выше). "Табличные" значения констант относятся лишь к сравнительно низким энергиям, но при этом охватывают подавляющее большинство природных явлений и экспериментов. Именно эти низкоэнергетические пределы и будут рассматриваться в данной работе.

Отметим, что действительно фундаментальные значения имеют только безразмерные комбинации физических постоянных, не зависящие от выбора единиц измерения. Мы рассмотрим две такие комбинации: постоянную тонкой структуры $\alpha = e^2 \pi c = 1/137.03599993(52)$ (численное значение согласно [2]; в скобках указана погрешность в последних значащих цифрах) и отношение масс протона и электрона $\mu = m_p/m_e = 1836.152701(37)$ (т.е. масса протона в системе единиц Хартри; приведено значение согласно [3]). Здесь $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ — скорость света в вакууме (принятая в настоящее время как переводной множитель от единиц времени к единицам длины [3]), $e = 4.803204251(10) \cdot 10^{-10} \text{ esu}$ — заряд электрона, $\hbar = 1.05457162(8) \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ — постоянная Планка, деленная на 2π , $m_p = 1.67262162(15) \cdot 10^{-24} \text{ g}$ — масса протона и $m_e = 9.1093821(8) \cdot 10^{-28} \text{ g}$ — масса электрона (все значения даны согласно [4]).

Постоянная α является основным параметром квантовой электродинамики, тогда как μ связано с постоянной сильного взаимодействия. Параметры α и μ являются определяющими для спектров атомов и молекул соответственно.

Из приведенных численных значений видно, что большинство фундаментальных постоянных измерены с относительной погрешностью $\sim 10^{-8}$. Воспроизводимость этих измерений исключает заметную вариацию параметров за небольшой промежуток времени, но не исключает их изменения за время существования Вселенной (~ 15 млрд лет). Более того, значения констант могли бы быть иными в пространственно удаленных областях Вселенной.

Проблема возможного изменения фундаментальных физических констант впервые обсуждалась Милном [5] и Дираком [6], выдвинувшим свою знаменитую "гипотезу больших чисел". В дальнейшем эта проблема рассматривалась многими авторами (например, [7]; см. также ссылки в [8]), но особенно актуальной она стала в последнее время в связи с бурным развитием моделей "Великого объединения" сильных и электрослабых взаимодействий (Great Unification Theories, или GUTs), а также более общих теоретических схем, где к этим взаимодействиям добавляется гравитационное [9,10]. Из указанных теорий следует, что фундаментальные константы могли бы иметь другие значения в иные космологические эпохи, а также в пространственно удаленных областях Вселенной. То, что эти значения одинаковы в разных, в том числе причинно не связанных областях пространства–времени, не является тривиальным фактом. Однако различные варианты теории предсказывают разную пространственно-временную зависимость фундаментальных постоянных. Ответить на вопрос о том, какая из теоретических моделей правильна, должен эксперимент.

В данной работе приведены результаты работ по исследованию спектров далеких внегалактических объектов, позволивших установить новые, наиболее надежные на сегодня верхние пределы возможного пространственно-временного изменения α и μ .

2. Способы проверки

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

Лабораторные тесты, как правило, заключаются в сравнении эталонов частоты, основанных на разных физических явлениях и, следовательно, по-разному 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. В частности, разные группы исследователей сравнивали с ним частоты излучения стабилизированных лазеров и мазеров. Точность этих экспериментов позволяла выявить относительные изменения фундаментальных констант на уровне $\sim 6 \cdot 10^{-14}$ в год, но статистически значимого эффекта не было обнаружено [11].

"Локальные тесты" основаны на анализе тех изменений, которые происходили бы в движении Земли и тел Солнечной системы, а также в физических условиях и процессах на них, если бы фундаментальные константы изменялись. Оказывается, такой анализ способен обеспечить более высокую точность, чем лабораторные измерения, главным образом потому что он позволяет проследить изменения, происходившие на протяжении гораздо большего времени. Так, анализируя изотопный состав метеоритов и древних геологических пород Земли, удается оценить характерное время альфа- и бета-распада находящихся в них долгоживущих радиоактивных элементов и сравнить его с периодом полураспада, измеренным в лаборатории. Периоды полураспада таких элементов весьма чувствительны к значению постоянной тонкой структуры α . На основе такого анализа Дайсон [7] показал, что относительное изменение α не может превосходить $\sim 10^{-14}$ в год. Позже на основе уточненных данных по бета-распаду ^{187}Re был получен предел $|\dot{\alpha}/\alpha| < 2 \cdot 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$ [12].

Еще более жесткая оценка была получена Шляхтером [13]. Он использовал данные об изотопном составе Sm в "отработанном топливе" природного ядерного реактора, действовавшего 1.8 млрд лет назад на месте современного уранового рудника Окло в Габоне. Недавно более подробный анализ провели Дамур и Дайсон [14]. Авторы заключили, что скорость относительного изме-

нения постоянной тонкой структуры $\dot{\alpha}/\alpha$ составляет не более 10^{-17} в год.

Слабым местом рассмотренных локальных тестов является их зависимость от модели изучаемого явления. Обычно модель достаточно сложна и включает целый ряд физических параметров. В частности, Дамур и Дайсон в своем анализе предполагали, что электростатическая (кулоновская) энергия возбужденного ядра ^{150}Sm , в которое превращается ядро ^{149}Sm после захвата нейтрона превосходит электростатическую энергию ядра ^{150}Sm в отсутствие возбуждения. Однако из экспериментов известно, что такая гипотеза справедлива далеко не всегда: среднеквадратичные радиусы возбужденных ядер могут отличаться от радиусов ядер в основном состоянии как в большую, так и в меньшую сторону [15,16]. Приведенное ограничение вызывает еще большие сомнения, если учесть, что разные физические параметры взаимно зависимы и могли бы меняться синхронно в процессе космологической эволюции. Как показано в [17], это могло бы ослабить предел более чем на порядок. Кроме того, было замечено [18,9], что при нелинейной зависимости фундаментальных констант от времени, которая допускается современными теориями, ограничения, справедливые для одного временного интервала, не годятся для другого. Как мы отметили выше, одновременно могла бы наблюдаться и пространственная зависимость. Таким образом, ограничения, справедливые для Солнечной

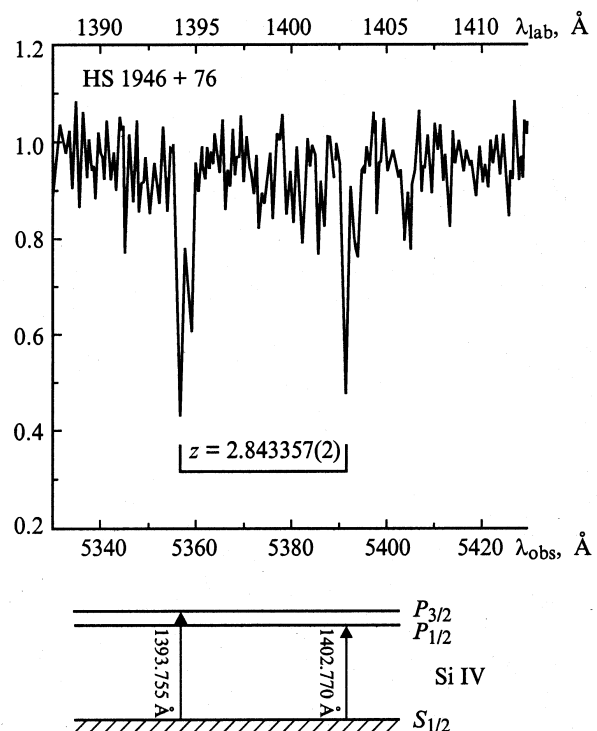


Рис. 1. Дублет тонкого расщепления резонансной линии Si IV в спектре квазара HS 1946 + 76, снятом на 6-метровом телескопе САО РАН. Схема энергетических уровней и переходов, соответствующих указанным линиям.

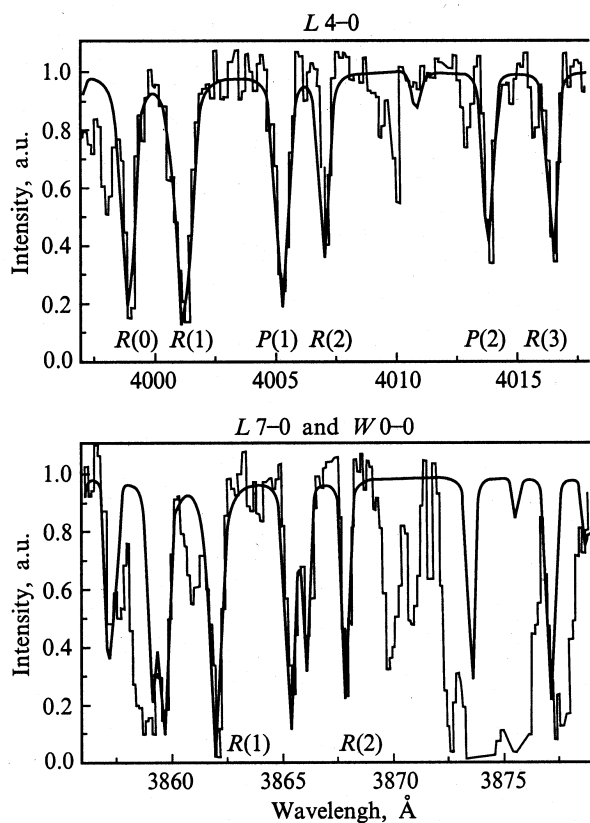


Рис. 2. Фрагменты спектра квазара PKS 0528–250, содержащие линии поглощения H₂ лаймановской и вернеровской серий.

системы, нельзя произвольно распространять на более далекие области пространства и на более ранние стадии жизни Вселенной. Только внегалактическая астрономия открывает возможность для исследования этих областей пространства–времени.

С этой целью полезно проанализировать спектры квазаров — самых мощных источников излучения, которые видны вплоть до расстояний 10–15 млрд световых лет. По пути от них свет пересекал облака межзвездного газа в ранних галактиках и частично поглощался ими. Поэтому спектральные линии, “впечатавшиеся” в спектры квазаров, несут информацию о физических условиях и состоянии вещества на ранних этапах эволюции Вселенной в различных пространственно удаленных ее областях.

Расширение Вселенной приводит к увеличению длин волн линий, наблюдаемых в спектрах квазаров (λ_{obs}), по сравнению с их лабораторными значениями (λ_0) в пропорции

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

где z — космологическое красное смещение.

По величине z можно определить t — “возраст” Вселенной в эпоху формирования спектральной линии. Например, на рис. 1 и 2 приведены фрагменты спектров

двух квазаров и отмечены линии поглощения с $z \approx 2.8$. Эти линии поглощения образовались, когда Вселенная была в 7–8 раз моложе, чем теперь. Для получения жестких оценок вариаций фундаментальных постоянных необходимо, чтобы изучаемые линии были достаточно узкими и были сняты с высоким спектральным разрешением и с высоким отношением сигнала к шуму. Линии дублета Si IV, показанные на рис. 1, и многие из линий молекулярного водорода на рис. 2, удовлетворяют данному условию.

3. Изменяется ли постоянная тонкой структуры?

Для того чтобы выяснить, не изменилось ли значение α за космологическое время, целесообразно исследовать тонкое расщепление дублетных линий ионов Si IV, C IV, Mg II и других, которые часто наблюдаются в спектрах далеких квазаров. Пример таких спектральных линий показан на рис. 1. Относительная величина расщепления этих линий $\delta\lambda/\lambda$ 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.

На первом этапе нашей работы были заново проанализированы все опубликованные данные о дублетных линиях тонкого расщепления, наблюдавшихся в спектрах квазаров, и составлен специальный каталог длин волн этих линий [19]. В итоге было рассмотрено около полутора тысяч пар дублетных линий с красными смещениями от 0.2 до 3.7. Анализ этих данных показал отсутствие статистически значимого отклонения отношения $\delta\lambda/\lambda$ от современного значения. Богатый материал наблюдений, собранный в нашем каталоге, позволил проанализировать также возможность различий в значениях α в причинно не связанных между собой областях Вселенной [20]. Оказалось, что зависимость величины тонкого дублетного расщепления (а значит, и параметра α) от направления на небесной сфере укладывается в рамки погрешности $|\Delta\alpha/\alpha| < 3 \cdot 10^{-3}$.

Необходимо отметить, однако, что в подавляющем большинстве случаев наблюдатели не ставили перед собой цели точного измерения тонкого расщепления, поэтому большая часть обработанных данных имела не очень высокую точность. Проведенный анализ позволил нам оптимизировать стратегию исследования зависимости $\alpha(z)$. На втором этапе работы, на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН, была реализована наша программа спектральных наблюдений нескольких квазаров, направленная на достижение максимально возможной точности измерений тонкого расщепления при больших красных смещениях [21]. В результате осуществления этой программы, а также использования данных наблюдений на других

телескопах [22–24] была определена средняя величина возможного отклонения постоянной тонкой структуры при $z = 2–4$ от его значения при $z = 0$ и ошибки ее измерения (статистическая и систематическая) [25]

$$\Delta\alpha/\alpha = (-4.2 \pm 5.4[\text{stat}] \pm 8.0[\text{syst}]) \cdot 10^{-5}. \quad (1)$$

Сравнение данных, полученных на телескопах, расположенных в северном и южном полушариях, позволило усилить предел на возможную зависимость постоянной тонкой структуры от направления на небесной сфере $|\Delta\alpha/\alpha| < 2 \cdot 10^{-4}$.

Недавно на основе наблюдений на 10-метровом телескопе Кекс I получен результат, имеющий формально более высокую точность: $\Delta\alpha/\alpha = (-1.88 \pm 0.53[\text{stat}]) \cdot 10^{-5}$ для $z = 0.6–1.6$. Однако авторы [26] не учитывали систематическую погрешность, возникающую главным образом из-за неопределенности в значениях опорных (лабораторных) длин волн, а эта погрешность, как видно из (1), является доминирующей.

Соответствующий (1) верхний предел (на уровне значимости 2σ) на среднюю за ~ 10 млрд лет скорость изменения α составляет

$$|\dot{\alpha}/\alpha| < 2 \cdot 10^{-14} \text{ yr}^{-1}. \quad (2)$$

Этот предел в пять раз жестче, чем полученный нами ранее [19,8], и в 3.5 раза превосходит по точности прецизионные лабораторные измерения [11].

4. Изменяется ли отношение масс протона и электрона?

Безразмерная постоянная $\mu = m_p/m_e$ приблизительно равна отношению констант сильного ядерного взаимодействия ($g^2/\hbar c$) ~ 14 и электромагнитного взаимодействия $\alpha \approx 1/137$. Здесь g — эффективная константа связи, которая вычисляется из амплитуды рассеяния π -мезонов на нуклонах.

Для того чтобы выяснить, не изменилось ли значение μ за космологическое время, можно использовать линии поглощения молекулярного водорода H_2 в спектрах квазаров. Изменение μ можно обнаружить, сравнивая длины волн различных линий в спектре квазара и в лаборатории. Существенно, что длины волн различных линий по-разному зависят от изучаемого параметра. Это позволяет отделить космологическое красное смещение от смещения, обусловленного изменением μ .

Наиболее подходящая для такого анализа система молекулярных линий с большим красным смещением — это система линий поглощения молекулы H_2 с $z = 2.8108$, обнаруженная Левшаковым и Варшаловичем [27] в спектре квазара PKS 0528–250. Мы вычислили коэффициенты чувствительности длин волн H_2 по отношению к возможному изменению параметра μ [28] и проанализировали наблюдательные данные [29],

используя высококачественный спектр PKS 0528–250, снятый Ланцеттой и др. на 4-метровом телескопе СТЮ. Фрагмент этого спектра приведен на рис. 2. Результаты измерений длин волн 50 линий молекулярного водорода привели с учетом упомянутых коэффициентов чувствительности к следующей оценке отклонения ($\Delta\mu$) параметра μ в эпоху, соответствующую $z = 2.8108$, от его современного значения:

$$\Delta\mu/\mu = (-11.5 \pm 7.6) \cdot 10^{-5}. \quad (3)$$

Кроме того, был проведен мультивариантный статистический анализ измеренного спектра, включающий совместную подгонку большего числа линий H_2 по ширине и интенсивности. Этот анализ привел к результату

$$\Delta\mu/\mu = (8.3_{-5.0}^{+6.6}) \cdot 10^{-5}. \quad (4)$$

Обе оценки совместимы в пределах 2σ с нулевой гипотезой об отсутствии изменения μ . Каждая из них соответствует ограничению средней (за 10 млрд лет) скорости относительного изменения отношения массы протона к массе электрона на уровне

$$|\dot{\mu}/\mu| < 2 \cdot 10^{-14} \text{ yr}^{-1}. \quad (5)$$

5. Выводы

Анализ квазарных спектров позволил установить жесткие верхние пределы на возможное изменение α — константы электромагнитного взаимодействия, а также отношения масс протона и электрона $\mu = m_p/m_e$. Эти величины могли бы меняться, если бы претерпевали изменения константы сильного и электрослабого взаимодействий. 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 0.02% за период порядка 10 млрд лет, охватывающий 80–90% времени существования Вселенной. Кроме того, значения фундаментальной постоянной α оказались одинаковыми (в пределах статистической погрешности 0.02%) 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 модели, предполагающей общее сверхбыстрое раздувание Вселенной по экспоненциальному закону на самой ранней стадии космологической эволюции (см., например, [30]).

В заключение еще раз подчеркнем тот факт, что полученные нами ограничения, основанные на анализе спектров квазаров, охватывают намного более широкие области пространства и интервалы времени (соответствующие космологическим красным смещениям вплоть до $z \approx 3.7$), чем локальные тесты (например, феномен

Окло, относящийся лишь к эпохе $z = 0.09$ и к одной точке пространства); к тому же они характеризуются гораздо большей независимостью от модельных предположений. Поэтому их можно рекомендовать как наиболее надежные на сегодняшний день. Они служат эффективными критериями отбора допустимых теоретических моделей элементарных взаимодействий, предсказывающих изменения физических постоянных на космологической шкале времени.

Работа выполнена в рамках Государственной научно-технической программы "Фундаментальная метрология" и "Астрономия" и поддержана РФФИ (грант № 96-02-16849а) и научно-учебным центром "Космион".

Список литературы

- [1] Okun L.B. Fundamental Constants of Nature. Preprint ITEP-TH-56/96, hep-ph/9612249. Moscow, 1996. 10 p.
- [2] Kinoshita T. // IEEE Trans. Instr. Meas. 1997. Vol. 46. P. 108.
- [3] Taylor B.N., Cohen E.R. // J. Res. National Inst. Stand. Technol. 1995. Vol. 95. P. 497.
- [4] Williams E.R., Steiner R.L., Newell D.B., Olsen P.T. // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 81. N 12. P. 2404–2407.
- [5] Milne E.A. // Nature. 1937. Vol. 139. P. 409.
- [6] Dirac P.A.M. // Nature. 1937. Vol. 139. P. 323.
- [7] Dyson F.J. Aspects of Quantum Theory / Ed. A. Salam, E.P. Wigner. Cambridge: Univ. Press, 1972. P. 213–236.
- [8] Varshalovich D.A., Potekhin A.Y. // Space Sci. Rev. 1995. Vol. 74. P. 259–268.
- [9] Damour T., Polyakov A.M. // Nucl. Phys. B. 1994. Vol. 423. P. 532–558.
- [10] Barrow J.D. // Theories of Everything. The Quest for Ultimate Explanation. Oxford: Clarendon Press, 1991.
- [11] Prestage J.D., Tjoelker R.L., Maleki L. // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74. P. 3511–3514.
- [12] Lindner M., Leich D.A., Borg R.J. et al. // Nature. 1986. Vol. 320. P. 246–248.
- [13] Shlyakhter A.I. // Nature. 1976. Vol. 264. P. 340.
- [14] Damour T., Dyson F. // Nucl. Phys. B. 1996. Vol. 480. P. 37–54.
- [15] Engfer R., Schneuwly H., Vuilleumier J.L. et al. // At. Data and Nucl. Data Tables. 1974. Vol. 14. P. 509–597.
- [16] Kalvius G.M., Shenoy G.K. // At. Data and Nucl. Data Tables. 1974. Vol. 14. P. 639–653.
- [17] Sisterna P., Vucetich H. // Phys. Rev. D. 1990. Vol. 41. P. 1034–1046.
- [18] Marciano W.J. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. P. 489–491.
- [19] Potekhin A.Y., Varshalovich D.A. // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1994. Vol. 104. P. 89–98.
- [20] Варшалович Д.А., Потехин А.Ю. // Письма в Астрон. журн. 1994. Т. 20. С. 883–889.
- [21] Варшалович Д.А., Панчук В.Е., Иванчик А.В. // Письма в Астрон. журн. 1996. Т. 22. С. 8–16.
- [22] Petitjean P., Rauch M., Carswell R.F. // Astron. Astrophys. 1994. Vol. 291. P. 29–56.
- [23] Cowie L., Songaila A. // Astrophys. J. 1996. Vol. 453. P. 596–598.
- [24] Outram P.J., Boyle B.J., Carswell R.F. et al. // Mon. Not. R. Astr. Soc. 1998. In press.
- [25] Иванчик А.В. Канд. дис. СПб., 1998. 71 с.
- [26] Webb J.K., Frumbaum V.V., Churchill C.W. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 82. P. 884–887.
- [27] Levshakov S.A., Varshalovich D.A. // Mon. Not. R. Astr. Soc. 1985. Vol. 212. P. 517–521.
- [28] Варшалович Д.А., Потехин А.Ю. // Письма в Астрон. журн. 1996. Т. 22. С. 3.
- [29] Potekhin A.Y., Ivanchik A.V., Varshalovich D.A. et al. // Astrophys. J. 1998. Vol. 505. P. 523–528.
- [30] Linde A. // Phys. Scr. 1991. Vol. T36. P. 30–54.