

П И С Ь М А  
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИОСНОВАН В 1965 ГОДУ  
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОДТОМ 68, ВЫПУСК 1  
10 ИЮЛЯ, 1998

Письма в ЖЭТФ, том 68, вып.1, стр.3 - 8

© 1998г. 10 июля

ЗАВИСИТ ЛИ КОНСТАНТА СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТ  
ВРЕМЕНИ?А.С.Барабаш<sup>1)</sup>

Институт теоретической и экспериментальной физики

117259 Москва, Россия

Поступила в редакцию 29 мая 1998 г.

Проведено сравнение вероятности процесса двухнейтринного двойного  $\beta$ -распада для  $^{82}\text{Se}$  и  $^{96}\text{Zr}$  в прямых (счетчиковых) и геохимических экспериментах. Проанализированы экспериментальные данные для  $^{130}\text{Te}$ . Показано, что в геохимических экспериментах, которые характеризуют вероятность  $2\beta(2\nu)$ -распада имевшую место  $10^9$  лет назад, эта вероятность систематически ниже. Сделано предположение, что это может быть связано с изменением константы слабого взаимодействия со временем. Предлагается провести серию новых прецизионных измерений как с помощью счетчиковых, так и геохимических экспериментов.

PACS: 23.40.-s

Вопрос о зависимости фундаментальных констант от времени был сформулирован П.Дираком в 1937 г. – это так называемая гипотеза больших чисел [1]. Позднее этот вопрос обсуждался в [2–7]. И хотя в исходном виде гипотеза П.Дирака не подтвердилась, интерес к данной проблеме вновь усилился в 80-е годы, поскольку в многомерных моделях Калуцы–Клейна [8, 9] и в суперструнных теориях [10] появляется зависимость констант связи от времени (см. также [11, 12]). Эти теории формулируются для многомерного пространства, которое затем должно быть компактифицировано до четырех наблюдаемых размерностей пространства–времени. Фундаментальные константы связи в этих теориях связаны с радиусами дополнительных размерностей и эти дополнительные размерности могут проявлять себя через временную зависимость констант связи. Радиусы могут сжиматься, возрастать или даже осциллировать. Не исключено, что процесс компактификации продолжается и в настоящее время. Зависимость фундаментальных констант от времени возникает и в моделях с безмассовым дилатоном, скалярным партнером гравитона [13].

С другой стороны, недавно была обнаружена явная регулярность в распределении галактик в направлении северного и южного галактических полюсов с характерной

<sup>1)</sup> e-mail: barabash@vxitep.itep.ru

шкалой  $128h^{-1}$  Мpc (где  $h \sim 0.5 - 1$ ;  $h$  – коэффициент, характеризующий неопределенность в значении постоянной Хаббла). [14]. Эта периодичность может быть объяснена осцилляциями со временем гравитационной постоянной  $G_N$  [15–18]. В работе [18], например, рассмотрена модель с осциллирующим массивным скалярным полем, которое является космологической "темной материей" и может быть обнаружено по осцилляциям гравитационной постоянной. Эта модель хорошо объясняет периодичность распределения галактик, обнаруженную в [14]. Косвенным свидетельством изменения  $G_N$  со временем могут служить и вариации солнечного года, обнаруженные при отложении кораллов и морских моллюсков [19]. Значение периода этих вариаций ( $\sim 400 - 600$  млн. лет) близко к значениям, необходимым для объяснения периодичности в распределении галактик.

Современные ограничения на возможные временные вариации различных фундаментальных констант можно найти в [20–29]. Так для константы слабого взаимодействия наиболее жесткие ограничения получены из анализа работы природного ядерного реактора в Окло<sup>2)</sup> [26]:  $|\Delta G_F|/G_F < 0.02$  (где  $\Delta G_F = G_F^{Oclo} - G_F^{now}$ ) или  $|\dot{G}_F/G_F| < 10^{-11}$  лет<sup>-1</sup>. Это значение превосходит ограничения, полученные ранее из анализа процессов нуклеосинтеза ( $|\Delta G_F|/G_F < 0.06$  [28]) и анализа  $\beta$ -распада  $^{40}\text{K}$  ( $|\dot{G}_F/G_F| < 10^{-10}$  лет<sup>-1</sup> [29]). Однако нужно помнить, что эти ограничения были получены в предположении постоянства всех остальных констант, что снижает надежность такого рода оценок. Не исключено, что вариации констант взаимосвязаны и эффект от изменения одной константы может компенсироваться эффектом от изменения другой.

Процесс двойного  $\beta$ -распада представляет самостоятельный интерес в рамках проблемы изменения фундаментальных констант со временем. Вероятность обычного  $\beta$ -распада пропорциональна  $G_F^2$ , а  $2\beta$ -распада –  $\sim G_F^4$  (поскольку  $2\beta$ -распад – процесс второго порядка по слабому взаимодействию);  $G_F$  – константа Ферми. Поэтому если, например, в обычном  $\beta$ -распаде эффект изменения  $G_F$  со временем скомпенсирован изменением других фундаментальных констант, то в  $2\beta$ -распаде этот эффект может проявиться. Таким образом, изучение зависимости скорости  $2\beta$ -распада от времени может дать дополнительную (а может быть и уникальную) информацию о возможном изменении  $G_F$  со временем. Напомним в связи с этим, что возраст минералов и метеоритов определяется радиоизотопными методами ( $\beta$ - и  $\alpha$ -распад). Поэтому, когда пытаются обнаружить зависимость скорости  $\beta$ -распада, например,  $^{40}\text{K}$  от времени, то эффект изменения  $G_F$  может маскироваться "неправильной" датировкой исследуемого образца.

Сравним скорость  $2\beta$ -распада, полученную в современных счетчиковых экспериментах, со скоростью этого же процесса, полученную в геохимических экспериментах, которые несут информацию о скорости  $2\beta$ -распада "в прошлом". Геохимические эксперименты основаны на выделении продуктов  $2\beta$ -распада из древних минералов с их последующим изотопным анализом. Обнаружение избыточного количества дочернего изотопа свидетельствует о наличии процесса  $2\beta$ -распада исходного изотопа и позволяет определить период его полураспада. Исследовались минералы, содержащие теллур, селен и цирконий и были измерены периоды полураспада  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{82}\text{Se}$  и  $^{96}\text{Zr}$ . Поскольку возраст исследуемых образцов составлял от  $\sim 28$  млн. лет до 4.5 млрд. лет, то, в принципе, из геохимических экспериментов можно извлечь

<sup>2)</sup> Впервые данные Окло были проанализированы на предмет возможного изменения фундаментальных констант со временем в работе [27].

информацию о значениях  $G_F$  "в прошлом" - вплоть до времени образования солнечной системы (4.5 млрд. лет назад). А если значение  $G_F$  осциллирует со временем, то можно обнаружить эти осцилляции.

Рассмотрим последовательно все имеющиеся экспериментальные данные.

1.  $^{82}\text{Se}$ . Наиболее точное "современное" значение периода полураспада  $^{82}\text{Se}$  по каналу  $2\beta(2\nu)$  получено на трековом детекторе NEMO-2 [30]:  $T_{1/2} = [0.83 \pm 0.09(\text{стат}) \pm 0.07(\text{сист})] \cdot 10^{20}$  лет (статистическая ошибка приведена на 68% уровне достоверности). В геохимических экспериментах были получены следующие значения:  $T_{1/2} = (1.30 \pm 0.05) \cdot 10^{20}$  лет [31] (среднее для 17 независимых измерений; возраст образцов от 80 млн. лет до 4.5 млрд. лет) и  $T_{1/2} = (1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{20}$  лет [32] (возраст образца  $\sim 1$  млрд. лет). Сравнение этих результатов показывает, что современное значение периода полураспада  $^{82}\text{Se}$  не совпадает со значением периода полураспада в прошлом (эффект на уровне  $\geq 3\sigma$ ). Если это связано с изменением значения константы слабого взаимодействия, то  $\Delta G_F/G_F \approx -0.1$ , а с учетом ошибок, возможная область значений  $\approx -(0.02 - 0.2)$  <sup>3)</sup>. Интересно отметить, что единственный эксперимент с метеоритом (возраст  $\sim 4.5$  млрд. лет) дал следующее значение периода полураспада -  $T_{1/2} = (1.03_{-0.42}^{+0.33}) \cdot 10^{20}$  лет [33]. Это значение совпадает в пределах ошибок с современным значением  $T_{1/2}(^{82}\text{Se})$ , но не закрывает возможности отличия от современного значения на  $\sim 50\%$ . Если  $G_F$  изменяется со временем не линейно, а осциллирует, то при благоприятном значении периода осцилляций возможно точное совпадение значений  $G_F$  сейчас и, например, 4.5 млрд. лет назад.

Точность современных значений периода полураспада  $^{82}\text{Se}$  может быть доведена до нескольких процентов, и такие измерения будут выполнены на трековом детекторе NEMO-3 [34]. Основная проблема - это уточнение результатов геохимических измерений. Современная масс-спектрометрия позволяет проводить подобные измерения с точностью до нескольких процентов (см., например, [35]). Возраст образцов тоже определяется, как правило, с точностью до нескольких процентов. Основная неопределенность в геохимических экспериментах с  $^{82}\text{Se}$  связана с определением эффективного времени "удержания" дочернего  $^{82}\text{Kr}$  в минералах. Для решения этой проблемы требуется выбор образцов с хорошо известной геологической "историей" и с возможностью точного определения времени удержания  $^{82}\text{Kr}$ .

2.  $^{96}\text{Zr}$ . Современное значение периода полураспада  $^{96}\text{Zr}$  по каналу  $2\beta(2\nu)$  было недавно измерено с помощью детектора NEMO-2 и составляет  $T_{1/2} = [2.1_{-0.4(\text{стат})}^{+0.8(\text{стат})} \pm 0.2(\text{сист})] \cdot 10^{19}$  лет [36]. В геохимическом эксперименте (возраст образца 1.7 млрд. лет) получено следующее значение -  $T_{1/2} = (3.9 \pm 0.9) \cdot 10^{19}$  лет [39]. Можно видеть, что современное значение периода полураспада примерно в 2 раза меньше, чем в прошлом. Однако ошибки в обоих экспериментах достаточно велики и нельзя сделать однозначного вывода о неравенстве периодов полураспада. Ситуацию могут прояснить новые измерения с  $^{96}\text{Zr}$  на установке NEMO-3 [34], в которых период полураспада будет определен с точностью 10%, и новые геохимические измерения с хорошей точностью (10-20%). Заметим, что в данном случае при  $2\beta$ -распаде  $^{96}\text{Zr}$

<sup>3)</sup> Эти значения получены с использованием зависимости  $T_{1/2} \sim G_F^{-4}$ . Если же использовать зависимость  $\sim G_F^{-2}$ , которая учитывает возможную "неправильную" датировку образца, то соответствующие значения составят  $\approx -(0.04 - 0.4)$ . Заметим однако, что в случае осцилляций интерпретация экспериментальных данных существенно усложняется и зависит от значения периода осцилляций.

образуется  $^{96}\text{Mo}$  – металл, а не газы, образующиеся при  $2\beta$ -распаде  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{128}\text{Te}$  и  $^{82}\text{Se}$  ( $^{130}\text{Xe}$ ,  $^{128}\text{Xe}$  и  $^{82}\text{Kr}$ , соответственно). Это позволяет надеяться на существенно меньшие проблемы с определением времени удержания продуктов распада в этом случае.

3.  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{128}\text{Te}$ . Для этих изотопов существуют только данные геохимических измерений. И хотя отношение периодов полураспада этих изотопов определено с высокой точностью ( $\sim 3\%$ ) [35], абсолютные значения  $T_{1/2}$  существенно отличаются в разных экспериментах. Одна группа авторов [32, 37, 38, 40] приводит следующие значения:  $T_{1/2} \approx 0.8 \cdot 10^{21}$  лет для  $^{130}\text{Te}$  и  $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{24}$  лет для  $^{128}\text{Te}$ , а другая [31, 35] –  $\approx (2.5 - 2.7) \cdot 10^{21}$  и  $\approx 2.7 \cdot 10^{24}$  лет, соответственно. Причем, как правило, эксперименты с "молодыми" образцами ( $\sim 100$  млн.лет) дают значения  $\sim (0.7 - 0.9) \cdot 10^{21}$  лет для  $^{130}\text{Te}$ , а для "старых" образцов ( $> 1$  млрд.лет) –  $\sim (2.5 - 2.7) \cdot 10^{21}$  лет<sup>4</sup>.

В основном, видимо, это связано с неправильной оценкой возраста удержания ксенона в старых образцах (см. обсуждение в [38]), но нельзя исключить, что, отчасти, это может быть связано и с изменением  $G_F$ . В этой связи очень важно провести прецизионные измерения современного значения периода полураспада  $^{130}\text{Te}$ . И такие измерения будут выполнены в ближайшем будущем в эксперименте с низкотемпературными детекторами  $\text{TeO}_2$  [41] и с помощью трекового детектора NEMO-3 [34]. Очевидно также, что необходимы новые геохимические измерения с образцами разного возраста и с точностью  $\sim 10\%$ . Эта задача может быть решена только при условии тщательного отбора исследуемых образцов (с хорошо известной историей и с возможностью точного определения времени удержания ксенона) и использования высокочувствительной масс-спектрометрии. К сожалению прямое измерение  $T_{1/2}(^{128}\text{Te})$  практически невозможно из-за слишком большого значения периода полураспада. Таким образом проведенный анализ показал, что:

1. Существует расхождение между значениями периода полураспада  $^{82}\text{Se}$ , полученными в современных счетчиковых экспериментах и в геохимических измерениях.

2. Данные для  $^{96}\text{Zr}$  имеют ту же тенденцию, что и для  $^{82}\text{Se}$  – то есть современное значение  $T_{1/2}$  меньше, чем полученные в геохимических измерениях. Однако ошибки измерений не позволяют сделать однозначного вывода о неравенстве периодов полураспада.

3. Геохимические измерения с молодыми образцами приводят к более низким значениям  $T_{1/2}(^{130}\text{Te})$  по сравнению со старыми образцами.

Все эти расхождения могут объясняться (по крайней мере частично) изменением  $G_F$  со временем. Если это действительно так, то это будет иметь самые серьезные следствия для современной физики и астрофизики. Но, именно поэтому, необходимо надежно подтвердить (или опровергнуть) сам факт этих расхождений. И это может быть сделано только в результате новых, более точных измерений. Предлагается следующее:

• провести прецизионные лабораторные измерения современных значений периода  $2\beta(2\nu)$ -распада для  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{130}\text{Te}$ ;

<sup>4</sup> Интересно отметить, что даже в очень тщательно выполненной работе [35], для образцов с возрастом 28 млн. лет было получено значение периода полураспада  $\sim 0.9 \cdot 10^{21}$  лет (см. таблицу VI в [35]), хотя окончательный результат ( $2.7 \cdot 10^{21}$  лет) получен при изучении образцов с возрастом  $> 1$  млрд. лет.

• провести новые, прецизионные измерения периодов полураспада  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{130}\text{Te}$  в геохимических экспериментах; для каждого изотопа желательнее провести измерения с образцами разного возраста, чтобы отследить характер зависимости  $G_F$  от времени;

• исследовать возможность проведения геохимических экспериментов с  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ,  $^{110}\text{Pd}$  и  $^{76}\text{Ge}$  и, если возможно, провести такие измерения; это позволит расширить круг исследуемых изотопов, так как периоды полураспада для  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$  и  $^{76}\text{Ge}$  в прямых (счетчиковых) экспериментах уже измерены [42–44], а для  $^{124}\text{Sn}$  и  $^{110}\text{Pd}$  могут быть измерены в самом ближайшем будущем. Для всех перечисленных изотопов продукты  $2\beta$ -распада не являются газами, что позволяет надеяться на существенно меньшие проблемы с их удержанием в исследуемых минералах.

В заключение хочу выразить свою признательность Л.Б.Окуню за прочтение рукописи и целый ряд полезных замечаний.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант #97-02-17344) и INTAS (грант #96-0589).

1. P.A.M.Dirac, *Nature* **139**, 323 (1937).
2. E.Teller, *Phys. Rev.*, **73**, 801 (1948).
3. L.D.Landau, *On the quantum theory of fields. - Niels Bohr and the Development of Physics*, Ed. W.Pauli, Pergamon Press, London, 1955.
4. C.Brans and R.H.Dicke, *Phys. Rev.* **124**, 925 (1961).
5. B.S.De Witt, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 114 (1964).
6. G.Gamow, *Phys. Rev. Lett.* **19**, 759 (1967).
7. F.J.Dyson, *The fundamental constants and their time variation. - Aspects of Quantum Theory*, Eds. A.Salam and E.P.Wigner, Cambridge Univ.Press, Cambridge, 1972.
8. A.Chodos and S.Detweiler, *Phys. Rev.* **D21**, 2167 (1980).
9. W.J.Marciano, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 489 (1984).
10. Y.-S.Wu and Z.W.Wang, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 489 (1984).
11. E.W.Kolb, M.J.Perry, and T.P.Walker, *Phys. Rev.* **D33**, 869 (1986).
12. J.Griego and H.Vucetich, *Phys. Rev.* **D40**, 1904 (1989).
13. T.Damour and A.M.Polyakov, *Nucl. Phys.* **B423**, 532 (1994).
14. T.J.Broadhurst, R.S.Ellis, D.C.Koo, and A.S.Szalay, *Nature* **343**, 726 (1990).
15. T.C.Hill, P.J.Steinhardt, and M.S.Turner, *Phys. Lett.* **B252**, 343 (1990).
16. M.Morikawa, *Astrophys. J.* **362**, L37 (1990).
17. M.Salgado, D.Sudarsky, and H.Quevedo, *Phys. Rev.* **D53**, 6771 (1996).
18. M.Salgado, D.Sudarsky, and H.Quevedo, *Phys. Lett.* **B408**, 69 (1997).
19. P.D.Sisterna and H.Vucetich, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 454 (1994).
20. J.H.Irvine and L.Humphreys, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **17**, 59 (1986).
21. J.Rich, O.D.Lloyd, and M.Spiro, *Phys. Rep.* **151**, 239 (1987).
22. Г.В.Клапдор-Клайнротхаус, А.Штаудт, *Неускорительная физика элементарных частиц*, М.: Наука, 1997.
23. P.Sisterna and H.Vucetich, *Phys. Rev.* **D41**, 1034 (1990).
24. Д.А.Варшолович, С.А.Левшаков, А.Ю.Потехин, *УФН*, **163**, 111 (1993).
25. D.A.Varshalovich, V.E.Panchuk, and A.V.Ivanchick, *Astr. Lett.* **22**, 6 (1996).
26. T.Damour and F.Dyson, *Nucl. Phys.* **B480**, 37 (1996).
27. A.I.Shlyakhter, *Nature*, **264**, 340 (1976).
28. H.Reeves, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 193 (1994).
29. F.J.Dyson, in: *Aspects of Quantum Theory*, Eds. A.Salam and E.P.Wigner, Cambridge University Press, Cambridge, 1972, p.213.
30. R.Arnold, C.Augier, J.Baker et al., submitted to *Nucl. Phys. A*, 1998.
31. T.Kirsten, E.Heusser, O.Kaether et al., *Proc. Int. Symp. Nuclear Beta Decay and Neutrino, Osaka'86*, Eds. T.Kotani et al., World Scientific, Singapore, 1987, p.81.
32. W.J.Lin, O.K.Manuel, G.L.Cumming et al., *Nucl. Phys.* **A481**, 477 (1988).
33. S.V.S.Murty and K.Marti, *Geochimica et Cosmochimica Acta.* **51**, 163 (1987).

34. A.S.Barabash, Proc. Int. Conf. "Neutrino'96", Eds. K.Enqvist et al., World Scientific, Singapore, 1997, p.374.
35. T.Bernatowicz, J.Brannon, R.Brazzle et al., Phys. Rev. **C47**, 806 (1993).
36. R.Arnold, C.Augier, J.Baker et al., submitted to Nucl. Phys. A , (1998).
37. N.Takaoka and K.Ogata, Z.Naturforsch. **21a**, 84 (1966).
38. O.K.Manuel, Proc. Int. Symp. Nuclear Beta Decay and Neutrino. Osaka'86, Eds. T.Kotani et al. World Scientific, Singapore, 1987, p.71.
39. A.Kawashima, K.Takahashi, and A.Masuda, Phys. Rev. **C47**, R2452 (1993).
40. N.Takaoka, Y.Motomura, and K.Nagano, Phys. Rev. **C53**, 1557 (1996).
41. A.Alessandrello, C.Brofferio, C.Bucci et al., Nucl. Instr. Meth. **A370**, 241 (1996).
42. D.Dassie, R.Eschbach, F.Hubert et al., Phys. Rev. **D51**, 2090 (1995).
43. R.Arnold, C.Augier, A.Barabash et al., Z. Phys. **C72**, 239 (1996).
44. M.Gunther, J.Hellmig, G.Heusser et al., Phys. Rev. **D55**, 54 (1997).