

P3-2009-104

Ю. А. Александров

**ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПОИСКА ОТКЛОНЕНИЙ  
ОТ НЬЮТОНОВСКОГО ЗАКОНА ТЯГОТЕНИЯ  
С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОНОВ МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ**

Доложено на Международной конференции по гравитации и космологии  
(RUSGRAV-13), Москва, июнь 2008 г.

Александров Ю. А.

P3-2009-104

Предложение поиска отклонений от ньютоновского закона тяготения с помощью нейтронов малых энергий

Ньютоновский закон тяготения хорошо проверен лишь на расстояниях порядка пяти и более миллиметров.

Для его проверки на меньших расстояниях предлагается использовать рассеяние медленных нейтронов на веществах, имеющих практически нулевую длину ядерного рассеяния и позволяющих увеличить тем самым относительный вклад гравитационного рассеяния. Одним из таких веществ является изотопическая смесь ядер вольфрама. Длина ядерного рассеяния подобной смеси, содержащей порядка 90 % вольфрама-186, может достигать при малых энергиях нейтронов (длина волны от 1 до 15 Å) нулевых значений. Осуществление прецизионных измерений зависимости длин рассеяния нейтронов от энергии и ее анализ могут позволить поискать и, возможно, существенно снизить диапазон расстояний (вплоть до размеров атома), где справедлив закон тяготения Ньютона.

Одним из методов измерений длин рассеяния может служить метод фильтров Кристиансена (рассеяние нейтронов на малые углы), позволяющий определять длины рассеяния с погрешностью до 0,1 % и, возможно, проверить ньютоновский закон тяготения до расстояний  $10^{-8}$  см или меньше.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Alexandrov Yu. A.

P3-2009-104

Proposition to Test Newton's Gravity Law Using Small-Energy Neutron Scattering

Newton's gravity law has been tested for certain only for distances no less than several millimeters. For testing the law for smaller distances it is suggested to use neutron scattering by the nuclei having very small nuclear scattering lengths  $a_{\text{coh}}$ , e. g., by a mixture of tungsten isotopes. At the concentration of tungsten-186 of about 90 % in the mixture,  $a_{\text{coh}}$  may turn to zero at low energies. Analysis of the energy dependence of  $a_{\text{coh}}$  can considerably reduce the range of distances (up to the size of an atom) where Newton's law is correct.

One of the methods of measurement may be the Christiansen-filter method (small-angle neutron scattering) allowing one to determine the value of  $a_{\text{coh}}$  with an uncertainty of no more than 0.1 %.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

Ньютоновский закон всемирного тяготения, установленный более 300 лет назад, в конце XVII в., имеет вид

$$F = -\frac{m_1 m_2 G}{r^2}, \quad (1)$$

где  $F$  — гравитационная сила притяжения;  $m_1$  и  $m_2$  — взаимодействующие массы;  $G$  — гравитационная постоянная.

К настоящему времени закон хорошо проверен (в макроскопических опытах) до расстояний порядка нескольких миллиметров. На меньших расстояниях закон прямым образом не проверялся, существуют лишь немногочисленные оценки отличия гравитационной силы от ньютоновского закона  $1/r^2$  [1–3].

В настоящей работе предлагается искать отклонения от формулы (1) с помощью рассеяния нейтронов низких энергий на ядрах с малой длиной ядерного рассеяния, например, на смеси изотопа вольфрама-186 (его содержание в смеси должно быть  $\alpha \approx 0,9$ ) с естественным вольфрамом. Длина рассеяния одной из таких смесей была измерена и составляет при  $\lambda = 15 \text{ \AA}$   $a_{\text{coh}} = -0,0466(6) \cdot 10^{-12} \text{ см}$  [4].

Одним из приемлемых методов измерения величины длины рассеяния является метод фильтров Кристиансена (в оптике он был впервые применен еще в 1884 г.). Суть метода заключается в следующем (см., например, [4, 5]). На хорошо сколлимированном пучке нейтронов (расходимость в горизонтальной плоскости не превышает 2–3 угловых минут) устанавливают так называемый фильтр Кристиансена, представляющий собой вертикальную полость из исследуемого вещества. Толщина полости в направлении пучка составляет несколько миллиметров, а по ширине она полностью перекрывает пучок. Пространство между крупинками порошка заполняют поочередно несколькими жидкостями с известными показателями преломления нейтронов. За фильтром на расстоянии нескольких метров на оси пучка устанавливают детектор нейтронов такой ширины, что он может регистрировать нейтроны, рассеянные фильтром на углы менее  $0,5^\circ$  в горизонтальной плоскости. Измерения заключаются в наблюдении интенсивности рассеяния нейтронов на малые углы фильтром при нескольких значениях показателя преломления заполняющей его жидкости. В качестве жидкости можно использовать, например, различные смеси тяжелой ( $Na_{\text{coh}} > 0$ ) и легкой ( $Na_{\text{coh}} < 0$ ) воды, где  $N$  — число ядер в единице объема.

В принципе, такое рассеяние должно полностью отсутствовать, если показатель преломления жидкости равен показателю преломления вещества порошка. Можно показать, что интенсивность рассеяния

$$I \sim (Na_{\text{coh}})_L - (Na_{\text{coh}})_P, \quad (2)$$

где  $L$  относится к жидкости, а  $P$  — к порошку.

Отсутствие рассеяния на малые углы, когда  $(Na_{\text{coh}})_L = (Na_{\text{coh}})_P$ , позволяет определить  $a_{\text{coh},P}$ . Погрешность эксперимента может не превышать 0,1 %.

Длину рассеяния нейтронов вольфрамом для случая малых энергий нейтронов можно записать в виде (см., например, [4, 5])

$$a_{\text{coh}} = R - \frac{\alpha \Gamma_n}{2k_0 E_0} \left(1 + \frac{E}{E_0}\right) + Z f a_{ne}, \quad (3)$$

где  $R$  — радиус ядра;  $\alpha$  — концентрация вольфрама-186 в смеси;  $k = 2,197 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{E}$  — волновое число (энергия  $E$  в эВ);  $\Gamma_n$  — нейтронная ширина первого резонанса вольфрама-186 ( $E_0 = 18,83$  эВ);  $f$  — атомный формфактор (при малых углах рассеяния можно показать, что  $f = 1$ );  $a_{ne}$  — длина рассеяния нейтрона на электроны (величина  $a_{ne} = -1,60(3) \cdot 10^{-16}$  см, именно она согласуется с мезонной теорией Юкавы [6]). При малых углах рассеяния для вольфрама величина  $Z f a_{ne} = -0,118 \cdot 10^{-13}$  см. Однако величина  $a_{ne}$  несущественна для рассматриваемого ниже эксперимента: важно лишь, чтобы  $Z f a_{ne}$  не зависела от энергии нейтрона.

Если выбрать величину  $\alpha$  таким образом, чтобы входящие в формулу (3) члены компенсировали друг друга, то суммарная длина рассеяния будет близка к нулю. При длине волны нейтрона  $\lambda = 15$  Å величина  $\alpha$  должна составлять при этом около 0,9. В интервале длин волн от 1 до 15 Å величина длины рассеяния будет изменяться при изменении энергии, но не очень сильно, поскольку  $E \ll E_0$  (при  $\lambda = 15$  Å  $E = 0,00036$  эВ, а  $E \sim 1/\lambda^2$ ).

Длины гравитационного рассеяния  $a_{\text{coh,grav}}$  можно вычислить в борновском приближении:

$$a_{\text{coh,grav}} = \frac{2m_n}{\hbar^2} \int_0^\infty V(r) \frac{\sin qr}{qr} r^2 dr, \quad (4)$$

где  $V(r) = -A/r^{n+1}$  — потенциал гравитации;  $q = 2k \sin \varphi/2$ ;  $\varphi$  — угол рассеяния;  $A$  — некоторая константа.

При  $n = 0$  справедлив ньютоновский потенциал гравитации  $V(r) = -\frac{m_n m_t G}{r}$ , где  $m_n$  — масса нейтрона,  $m_t$  — масса атома мишени, и вычисления согласно формуле (4) приводят к  $a_{\text{coh,grav}} \approx -10^{-32}$  см, т. е. довольно малой величине. Ее практически невозможно измерить.

При  $n = 1$

$$V(r) = -A_1/r^2. \quad (5)$$

Так, например, в электрослабом варианте теории [1] согласно работе [7] при  $n = 1$   $A_1 = \frac{m_n^2 m_t G R_c}{\hbar^2}$ , где  $R_c$  — расстояние, в пределах которого

действует выбранный потенциал  $\sim 1/r^2$ , а на больших расстояниях при  $r \geq R_c$  справедлив ньютоновский потенциал  $\sim 1/r$ . Согласно работе [7] при  $n = 1$  можно получить также  $R_c = 1,2 \cdot 10^{17}$  см и

$$A_1 = m_n^2 m_t c^6 (G_f)^{3/2}, \quad (6)$$

где  $G_f = 1,166 \cdot 10^{-5}$  ГэВ $^{-2}$ , и можно получить из формулы (4), что

$$a_{\text{coh,grav}} = -\frac{A}{q} \int_0^{R_c} \frac{\sin qr}{r} dr \approx -\frac{\pi A}{2q}. \quad (7)$$

Вычисления по формуле (7) приводят к гравитационным длинам рассеяния:

$$\begin{aligned} a_{\text{coh,grav}} &= -6,77 \cdot 10^{-10} \text{ см при } \lambda = 25 \text{ \AA}, \\ a_{\text{coh,grav}} &= -3,10 \cdot 10^{-11} \text{ см при } \lambda = 1,1 \text{ \AA}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для сравнения следует напомнить, что длины рассеяния нейтронов тяжелыми ( $Z > 50$ ) ядрами составляют обычно  $a \approx 5 \cdot 10^{-13}$  см, т.е. значительно меньше. Правда, согласно работе [1] вариант  $n = 1$  вряд ли реализуется в природе, поскольку  $R_c \approx 10^{17}$  см и Солнечная система, видимо, не была бы стабильной. Однако не следует забывать, что электрослабый вариант теории [1] следует рассматривать лишь как оценочный: величина  $R_c$  может измениться, например, в 137 раз ( $137 = 1/\alpha$ , где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры) даже в работе [1].

При  $n = 2$   $V(r) = -A_2/r^3$ . Согласно работе [7] в электрослабом варианте  $R_c \approx 2,8$  см, и можно получить из формулы (4) настоящей работы

$$a_{\text{coh,grav}} = -\frac{2}{3} m_n^2 m_t G_f^2 c^7 \hbar \int_0^{R_c} \frac{\sin qr}{qr^2} dr. \quad (9)$$

При  $r = 0$  данный интеграл расходится. Однако, полагая в интервале длин от 0 до  $R$   $m_t = m_T \cdot \frac{r^3}{R^3}$ , где  $R$  — радиус ядра, а  $m_T$  — масса ядра, можно получить для рассматриваемого случая малых  $qR$

$$a_{\text{coh,grav}} = -A_2(0,756 - \ln(qR)), \quad (10)$$

где

$$A_2 = \frac{2}{3} m_n^2 m_T G_f^2 c^7 \hbar, \quad (11)$$

и

$$\begin{aligned} a_{\text{coh,grav}} &= -5,44 \cdot 10^{-21} \text{ см при } \lambda = 25 \text{ \AA} \\ a_{\text{coh,grav}} &= -4,56 \cdot 10^{-21} \text{ см при } \lambda = 1,1 \text{ \AA}. \end{aligned} \quad (12)$$

При  $n > 2$  величина  $a_{\text{coh,grav}}$  в электрослабом варианте сильно уменьшается (так, при  $n = 3$   $a_{\text{coh,grav}} \approx 10^{-26}$  см).

Несколько слов о возможностях предлагаемого метода поиска гравитационной длины рассеяния. Прежде всего, он значительно более прост для экспериментаторов, поскольку не нуждается во многих систематических поправках, недостаточно хорошо измеренных в настоящее время, но необходимых для ряда других вариантов предложений (см., например, работу [3]).

Опираясь на работу [8], можно полагать, что для используемой смеси изотопов вольфрама отклонение длины рассеяния от линейной энергетической зависимости вследствие ядерного взаимодействия маловероятно. Однако в случае экспериментального обнаружения отклонения длины рассеяния от подобной линейной энергетической зависимости следует более внимательно рассмотреть данный вопрос. Так, гравитационная длина рассеяния может вести себя как  $1/k \sim 1/\sqrt{E}$  при  $n = 1$  (формула (7)) или еще более сложным образом (формула (10)), что иногда возможно и для случая ядерного взаимодействия (см. работу [8]).

Далее, если считать достаточно справедливыми формулы (2) и (3), то, принимая наименьшую погрешность в известных опытах по методу фильтров Кристиансена равной  $\pm 2 \cdot 10^{-16}$  см (см., например, книгу [9]), можно полагать, что допустимая измеряемая длина гравитационного рассеяния в настоящее время может составить величину порядка  $5 \cdot 10^{-16}$  см. Однако погрешность измерений возможно уменьшить, и предложенный выше метод измерений, видимо, все-таки близок к наиболее актуальному.

Автор благодарен В. Г. Кадышевскому за полезное обсуждение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Frank A., Van Isacker P., Gomez-Camacho J. // Phys. Lett. B. 2004. V. 582. P. 15.
2. Alexandrov Yu. JINR Preprint E3-2006-142. Dubna, 2006.
3. Pokotilovski Yu. // Yad. Fiz. 2006. V. 69. P. 924.
4. Alexandrov Yu. A., Koester L., Samosvat G. S. JINR Communication E3-5371. Dubna, 1970.
5. Alexandrov Yu. Fundamental Properties of the Neutron. Oxford: Clarendon Press, 1992.
6. Alexandrov Yu. // ISINN-3. Dubna, 1995. P. 243.
7. Alexandrov Yu. // Gravitation and Cosmology. 2008. V. 14. P. 283.
8. Alexandrov Yu., Samosvat G. // VI Intern. School on Neutr. Phys., Alushta, 1990. V. 1. P. 187.
9. Rauch H., Waschkowski W. // Landolt-Bornstein. Low Energy Neutron Physics, Springer. 2000. P. 6–1.

Получено 7 июля 2009 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 07.08.2009.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,43. Уч.-изд. л. 0,51. Тираж 290 экз. Заказ № 56679.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)