

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ РЕЛИКТОВЫХ МАССИВНЫХ НЕЙТРИНО

В.Ф.Шварцман, В.Б.Брагинский, С.С.Герштейн,
Я.Б.Зельдович, М.Ю.Хлопов

Указано, что эффект когерентного усиления взаимодействия массивных реликтовых нейтрино с зернами вещества размером порядка длины волны нейтрино позволяет поставить вопрос об обнаружении нейтринного моря Галактики по оказываемому им механическому давлению в направлении противоположном движению Солнечной системы в галактике.

Экспериментальные указания¹ на наличие у нейтрино массы ~ 30 эВ и анализ²⁻¹⁰ влияние реликтовых массивных нейтрино на эволюцию Вселенной и на образование галактик делают крайне актуальным поиск возможных лабораторных методов регистрации реликтовых массивных нейтрино. Цель настоящей статьи – обратить внимание на указанный одним из авторов (В.Ф.Ш.) еще в 1970 г. эффект когерентного усиления механического воздействия нерелятивистских нейтрино на зерна вещества с размером порядка длины волны нейтрино. Этот эффект дает принципиальную возможность проверить в лабораторных опытах справедливость гипотезы о космологической роли массивных нейтрино²⁻¹⁰.

Теория горячей Вселенной предсказывает²⁻¹⁰ наличие в современной Вселенной фона реликтовых нейтрино со средней плотностью $N_\nu 150 \text{ см}^{-3}$, где N_ν – число сортов нейтрино. Если бы распределение реликтовых нейтрино с массой $m_\nu \approx 30$ эВ было бы однородным, они имели бы в настоящее время²⁻¹⁰ среднюю скорость ~ 5 км/с и длину волны $\lambda = h/mv = 0,2$ см. В действительности,^{2-6, 9, 10} массивные нейтрино должны быть распределены неоднородно, конденсируясь⁴⁻⁶ в Галактике со средней плотностью $n_\nu \approx 10^7 \text{ см}^{-3}$. Средняя скорость нейтрино в Галактике должна быть⁴⁻⁶ порядка величины скорости движения Солнечной системы в Галактике $v \approx 300$ км/с и соответственно меньшей оказывается их длина волны: $\lambda \approx 4 \cdot 10^{-3}$ см. Даже в этом случае длина волны нейтрино остается макроскопической, так что рассеяние нейтрино на пылинке размера $a < \lambda$ должно происходить когерентно. То же справедливо и для тела, заполненного менее, чем на половину отдельными пылинками размера $a \lesssim \lambda$ или для пористого тела с таким размером пор. (При большей плотности заполнения тела пылинками или при меньшем размере пор возникает деструктивная интерференция вкладов отдельных пылинок или отдельных частей пористого тела и когерентность разрушается. Деструктивная интерференция возникает и в случае больших размеров пылинок ($a > \lambda$)). Движение Солнечной системы относительно изотропного „нейтринного моря Галактики” вызывает ускорение таких тел, обусловленное когерентным рассеянием нейтрино. Указанный эффект должен проявляться в опытах типа опыта Этвеша. При $m_\nu \approx 30$ эВ нейтринное море сообщает 1 г вещества ускорение $\sim 10^{-22}$ см/с², вызываемое $2 \cdot 10^3$ рассеяний нейтрино за 1 с.

Приведем оценки рассматриваемого эффекта. Рассеяние ν_e на электронах обусловлено интерференцией нейтральных и заряженных токов, рассеяние ν_e на ядрах и рассеяние ν_μ, ν_τ на ядрах и электронах происходит только за счет нейтральных токов. В нерелятивистском пределе соответствующие амплитуды когерентного рассеяния на шарике плотности ρ и размера $a \lesssim \lambda$ одинаковы для нейтрино и антинейтрино и имеют вид (см. также^{11, 12}).

$$A(\nu_\nu, \nu_\tau) = - \frac{Gm_\nu}{4\sqrt{2}\pi} (A - Z)N_A, \quad (1)$$

$$A(\nu_e) = \frac{Gm_\nu}{4\sqrt{2}\pi} (3Z - A)N_A.$$

где Z — заряд и A — атомный номер ядер атомов вещества, m_ν — масса нейтрино, $N_A = (\rho/Am_p)(4\pi/3)a^3$ — число атомов в шарике. Если массовая матрица нейтрино диагональная, то ν_e , ν_μ и ν_τ имеют определенную массу. Для сечения когерентного рассеяния нейтрино в этом случае получаем

$$\sigma = \sigma_0 N_A^2 k_L^2, \quad (2)$$

где $\sigma_0 = (G^2 m_\nu^2 / \pi) = 1,3 \cdot 10^{-53} \text{ см}^2$ для $m_\nu = 30 \text{ эВ}$, $k_L = 3Z - A$ для ν_e и $k_L = Z - A$ для ν_μ , ν_τ . Рассеяние нейтрино на шарике вызывает передачу ему импульса $\Delta p \sim 2m_\nu v$, поэтому когерентное рассеяние потока нейтрино $F_\nu = n_\nu v$ отвечает действующей на шарик силе

$$f = \frac{dp}{dt} = F_\nu \sigma \Delta p = 2n_\nu v \sigma_0 N_A^2 k_L^2 m_\nu v, \quad (3)$$

сообщающей ему ускорение

$$w = \frac{f}{AN_A m_p} = 10^{-22} \text{ см/с}^2 (k_L/A)^2 \quad (4)$$

при $n_\nu = 10^7 \text{ см}^{-3}$, $v = 3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, $a = \lambda$, $\rho = 10^2 / \text{см}^3$. Ускорение (4) максимально при $a = \lambda$, причем его максимальное значение $w_{max} = 10^{-22} \text{ см/с}^2 (k_L/A)^2$ не зависит от величины массы нейтрино. Измерение величины w для вещества с различными Z/A в принципе позволяет выделить вклады ν_e и других сортов нейтрино и тем самым получить недоступную другим лабораторным методам информацию о величине массы ν_μ и ν_τ .

В случае недиагональной массовой матрицы ν_e , ν_μ и ν_τ являются суперпозициями состояний ν_1 , ν_2 и ν_3 с определенными массами m_1 , m_2 , m_3 :

$$\nu_i = \sum_L a_{iL} \nu_L, \quad L = e, \mu, \tau; \quad i = 1, 2, \dots$$

В этом случае когерентно будут рассеиваться именно ν_i с сечением

$$\sigma_i = \sigma_0 N_A^2 k_i^2, \quad (5)$$

где $k_i^2 = |A - Z - 2Z \sum e_i a_{ei} a_{ej}^*|^2$. При этом измерение ускорения (4) для различных веществ позволит получить информацию о смешивании нейтрино.

Ряд аналогичных эффектов рассматривался ранее. Обусловленное нейтральным векторным током когерентное рассеяние нейтрино на ядрах обсуждалось в ^{13, 14}. Макроскопические эффекты когерентного рассеяния безмассовых нейтрино в веществе обсуждались в ^{11, 15, 16}, а возможности регистрации нейтрино по их механическому воздействию рассматривались в ^{10-12, 15, 16}. Обсуждение ¹² возможного ускорения тела за счет поверхностного давления реликтовых массивных нейтрино, обусловленного изменением коэффициента преломления нейтрино в веществе, привело к выводу о практической невозможности зарегистрировать такой эффект. Для пористого вещества или для тела, заполненного пылинками, рассмотренный нами эффект является объемным, что существенно увеличивает величину сообщаемого телу ускорения ($w \sim 10^{-22} \text{ см/с}^2$).

Дополнительное усиление эффекта могло бы обеспечить регулярное расположение рассеивающих центров на расстояниях $\sim \lambda$. В этой связи представляет интерес поиск эффекта с помощью системы параллельных проволочек диаметра $\sim \lambda$, расположенных на расстоянии $\sim \lambda$, друг от друга. В такой системе эффект максимален при ориентации проволочек перпендикулярно направлению движения Солнечной системы в Галактике

Современная „культура“ измерения малых ускорений примерно соответствует величине 10^{-16} см/с^2 при времени выделения $\sim 10^7 \text{ с}$. Однако, ¹⁷ принципиальный предел на измерение сколь угодно малых ускорений отсутствует, причем при ускорении, превышающих $2 \times 10^{-24} \text{ см/с}^2$ (если время выделения сигнала $\sim 10^7 \text{ с}$, частота модуляции $\sim 10^3 \text{ рад/с}$ и суммарная масса пробного тела $\sim 10 \text{ кг}$) нет необходимости использовать квантовые неразрушающие измерения.

Литература

1. Любимов В.А., Новиков Е.Г., Нозик В.З., Третьяков Е.Ф., Козик В.С. ЯФ, 1980, 32, 310.
2. Зельдович Я.Б., Сюняев Р.А. Письма в Астрон. ж., 1980, 6, 451.
3. Дорошкевич А.Г., Зельдович Я.Б., Сюняев Р.А., Хлопов М.Ю. Письма в Астрон. ж., 1980, 6, 456.
4. Дорошкевич А.Г., Зельдович Я.Б., Сюняев Р.А., Хлопов М.Ю. Письма в Астрон. ж., 1980, 6, 465.
5. Doroshkevich A.G., Khlopov M.Yu., Sunyaev R.A., Szalay A.S., Zeldovich Ya.B. Proc. „Neutrino-80”, 1980.
6. Doroshkevich A.G., Khlopov M.Yu., Sunyaev R.A., Szalay A.S., Zeldovich Ya.B. Proc. Xth Texas Symp., 1981.
7. Герштейн С.С., Зельдович Я.Б. Письма в ЖЭТФ, 1966, 4, 120.
8. Cowsic T., McClelland J. Phys. Rev. Lett., 1972, 29, 609.
9. Szalay A.S., Marx G. Astron. & Astrophys., 1976, 49, 437.
10. Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю. УФН, 1981, 135, 45.
11. Lewis R.R. Phys. Rev., 1980, D21, 663.
12. Cabibbo N., Maiani L. Preprint Univ. di Roma, 1982.
13. Конелиович В.Б., Франкфурт П.П. Письма в ЖЭТФ, 1974, 19, 236.
14. Freedman D.Z. Phys. Rev., 1974, D9, 1389.
15. Opher R. Astron. & Astrophys., 1974, 37, 135.
16. Stodolski L. Phys. Rev. Lett., 1974, 34, 110.
17. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах, М.: Наука, 1974.

Институт прикладной математики
им. М.В.Келдыша
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
18 августа 1982 г.