

УДК 539.12.01

ОСЦИЛЛЯЦИИ $n-\bar{n}$ В НЕЙТРОННЫХ ПОТОКАХ, ИДУЩИХ ОТ СОЛНЦА К ЗЕМЛЕ*Л. С. Молчатский*Поволжская государственная социально-гуманитарная академия,
443099, Самара, ул. М. Горького, 65/67.

E-mail: levmolchatsky@mail.ru

Рассмотрен процесс $n-\bar{n}$ осцилляций в солнечных космических лучах. Показано, что он имеет высокую интенсивность в сравнении с аналогичными процессами на Земле ($I_{c-r}/I_{Earth} \propto 10^8$), т. к. магнитное поле сильно подавляет $n-\bar{n}$ осцилляции. Найдена зависимость потока \bar{n} и \bar{p} частиц в окрестности Земли от энергии излучаемых нейтронов. Полученные результаты являются аргументом для поиска $n-\bar{n}$ переходов в экспериментах с солнечными космическими лучами.

Ключевые слова: нейтрон-антинейтронные осцилляции, солнечные космические лучи.

Введение. Проблема поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций (НАО) является одной из актуальных задач физики элементарных частиц. По своей фундаментальности она, возможно, не уступает проблеме поиска частиц Хиггса. В реальных экспериментах только два процесса могут свидетельствовать о несохранении барионного заряда (БЗ): это распад протона и НАО [1, 2].

Понятие БЗ как сохраняющейся физической величины было введено Штюкельбергом в 1938 году с целью объяснения стабильности атомов и атомных ядер. В самом деле, закон сохранения электрического заряда не запрещает захват протоном электрона на орбите в атоме водорода и превращения атома в фотонный ливень в результате реакции $pe^- \rightarrow \gamma^0\gamma^0$. Эта реакция запрещена законом сохранения БЗ.

Однако многочисленные эксперименты типа опыта Этвеша показали, что БЗ не имеет динамического смысла, так как барионное поле отсутствует. С точки зрения современных физических теорий это означает, что он не связан с какой-либо калибровочной симметрией и, следовательно, не является строго сохраняющейся величиной.

Модели гранд-унификации, основанные на группах $SU(5)$ и $SO(10)$ симметрий, а также модели суперсимметрии предсказывают процессы с несохранением БЗ, которые должны происходить за счёт обмена между кварками гипотетическими виртуальными сверхмассивными квантами. Ожидаемая вероятность этих процессов из-за большой массы виртуальных частиц очень мала.

Эксперименты по поиску распадов протона ведутся около 30 лет. Они позволили установить нижнюю границу для среднего времени жизни протона [3]: $\tau_p > 10^{33}$ лет. Опыты с пучками холодных нейтронов, идущих от ядерного реактора, которые начались примерно 20 лет назад в Гренобле, также не привели к положительному результату: установлена нижняя граница ($T_{n-\bar{n}} > 0,86 \cdot 10^8$ с) для периода НАО [3]. В настоящее время возлагаются большие надежды на опыты с ультрахолодными нейтронами в ловушках [4, 5].

В данной работе исследуется возможность поиска НАО в солнечных кос-

Лев Соломонович Молчатский (к.ф.-м.н., доцент), доцент, каф. теоретической физики.

мических лучах (СКЛ) при вспышках на Солнце. При этом имеются в виду два благоприятных обстоятельства для наблюдения НАО в СКЛ: большая длина пробега частиц и слабое магнитное поле в межпланетной среде.

1. Смешивание состояний n и \bar{n} . Осцилляции. Если БЗ не сохраняется, то оператор БЗ \hat{B} и оператор Гамильтона \hat{H} не коммутируют: $[\hat{B}, \hat{H}] \neq 0$. А это означает, что состояния с определёнными значениями БЗ:

$$|n\rangle(\hat{B}|n\rangle = +1|n\rangle) \quad \text{и} \quad |\bar{n}\rangle(\hat{B}|\bar{n}\rangle = -1|\bar{n}\rangle)$$

не являются стационарными. Стационарные состояния $|1\rangle(\hat{H}|1\rangle = E_1|1\rangle)$ и $|2\rangle(\hat{H}|2\rangle = E_2|2\rangle)$ связаны с зарядовыми состояниями ортогональным преобразованием:

$$|1\rangle = \cos\theta|n\rangle + \sin\theta|\bar{n}\rangle, \quad |2\rangle = -\sin\theta|n\rangle + \cos\theta|\bar{n}\rangle, \quad (1)$$

где θ — угол смешивания состояний, характеризующий степень отклонения от закона сохранения БЗ.

Пусть в начальный момент времени при $t' = 0$ система $n-\bar{n}$ находится в нейтронном состоянии, т. е. $\psi(0) = |n\rangle$. Если имеет место смешивание состояний (1), то в момент времени $t' = t$ система в результате эволюции перейдёт в состояние

$$\begin{aligned} \psi(t) = \cos\theta e^{-iE'_1 t}|1\rangle - \sin\theta e^{-iE'_2 t}|2\rangle = \cos\theta e^{-iE'_1 t}(\cos\theta|n\rangle + \sin\theta|\bar{n}\rangle) - \\ - \sin\theta e^{-iE'_2 t}(-\sin\theta|n\rangle + \cos\theta|\bar{n}\rangle) = (\cos^2\theta e^{-iE'_1 t} + \sin^2\theta e^{-iE'_2 t})|n\rangle + \\ + (1/2)\sin 2\theta(e^{-iE'_1 t} - e^{-iE'_2 t})|\bar{n}\rangle. \end{aligned}$$

Из этого выражения следует, что амплитуда вероятности перехода $n \rightarrow \bar{n}$ определяется равенством

$$A(n \rightarrow \bar{n}) = \frac{1}{2} \sin 2\theta (e^{-iE'_1 t} - e^{-iE'_2 t}). \quad (2)$$

Здесь и далее используется система единиц, в которой $\hbar = 1$.

При сохранении БЗ энергетические уровни свободной системы вырождены: $E'_1 = E'_2$. В противном случае уровни стационарных состояний расщеплены на величину $\Delta E' = E'_1 - E'_2$. Для дальнейшего рассмотрения полезно представить энергетические уровни в форме $E'_1 = E' + \Delta E'/2$; $E'_2 = E' - \Delta E'/2$. Кроме того, необходимо учесть тот факт, что свободные нейтрон и антинейтрон подвержены β -распаду, поэтому энергетические уровни имеют ширину $\Gamma = 1/\tau_n$, где τ_n — среднее собственное время жизни нейтрона. Чтобы учесть нестабильность нейтрона, достаточно произвести замену $E' = E - i\Gamma/2$. После этих операций формула (2) приобретает вид

$$A(n \rightarrow \bar{n}) = -ie^{-iEt} e^{-\Gamma t/2} \sin 2\theta \sin(\Delta E/2)t. \quad (3)$$

Таким образом, вероятность превращения нейтрона в антинейтрон за время t определяется формулой

$$P(n \rightarrow \bar{n}) = e^{-\Gamma t} \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta E/2)t. \quad (4)$$

2. Влияние внешнего поля на процесс осцилляций. При сохранении БЗ матрица, соответствующая оператору \hat{H} в зарядовом представлении, диагональна. При несохранении барионного заряда недиагональный матричный элемент $\delta = \langle \bar{n} | \hat{H} | n \rangle$ характеризует степень нарушения закона сохранения БЗ. Угол смешивания θ связан с этим параметром и величиной расщепления уровней энергии. Установим эту связь, используя преобразования, обратные ортогональным преобразованиям (1):

$$\delta = \langle \bar{n} | \hat{H} | n \rangle = (\sin \theta \langle 1 | + \cos \theta \langle 2 |) \hat{H} (\cos \theta | 1 \rangle - \sin \theta | 2 \rangle) = (1/2) \sin 2\theta (E_1 - E_2),$$

так как $\langle 1 | \hat{H} | 2 \rangle = \langle 2 | \hat{H} | 1 \rangle = 0$ и $\langle 1 | \hat{H} | 1 \rangle = E_1$, $\langle 2 | \hat{H} | 2 \rangle = E_2$. Таким образом, эта связь выражается формулой

$$\sin 2\theta = 2\delta / (E_1 - E_2). \quad (5)$$

В общем случае расщепление $E_1 - E_2$ связано с разностью $E_n - E_{\bar{n}}$, где E_n и $E_{\bar{n}}$ — диагональные матричные элементы оператора \hat{H} в зарядовом представлении:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \sqrt{(E_n - E_{\bar{n}})^2 + 4\delta^2}. \quad (6)$$

Это соотношение выводится с помощью преобразования, обратного (1).

Из (4)–(6) вытекает, что свободные НАО описываются уравнением

$$P(n \rightarrow \bar{n}) = e^{-\Gamma t} \sin^2 \delta t, \quad (7)$$

так как в этом случае $E_n = E_{\bar{n}}$. При осцилляциях в присутствии внешнего магнитного поля ситуация меняется, потому что нейтрон обладает магнитным моментом, и взаимодействие магнитного момента $\vec{\mu}$ с внешним полем с индукцией \vec{B} вносит в систему дополнительную энергию $U = -(\vec{\mu}, \vec{B})$. При переходе $n \rightarrow \bar{n}$ магнитный момент меняет знак, что ведет к изменению энергии взаимодействия системы с внешним полем на величину $|E_n - E_{\bar{n}}| = 2|\mu|B$.

Принимая это во внимание, посредством соотношений (4)–(6) приходим к выводу, что НАО во внешнем магнитном поле с индукцией B описываются формулой

$$P(n \rightarrow \bar{n}) = \frac{\delta^2}{(\mu B)^2 + \delta^2} e^{-\Gamma t} \sin^2 \sqrt{(\mu B)^2 + \delta^2} t. \quad (8)$$

3. Антинуклоны в солнечных космических лучах в окрестности Земли как следствие $n-\bar{n}$ осцилляций. Согласно астрофизическим данным [4–8] при вспышках на Солнце в межпланетное пространство выбрасываются мощные потоки нейтронов. Потоки нейтронов с энергией $E > 100$ МэВ, возникшие в результате вспышек в 1990 и 1991 годах, были зафиксированы детекторами на Земле [6–8]. Исследование солнечных нейтронных потоков с энергией частиц от 20 до 300 МэВ планируется в рамках программы КОРОНАС–ФОТОН, которую возглавляет МИФИ [8].

Если в природе существуют НАО, то в потоках, идущих от Солнца к Земле, должны иметь место переходы

$$n \rightarrow \bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu_e. \quad (9)$$

Аргументом в пользу существования этих процессов могло бы стать присутствие антинейтронов и антипротонов в СКЛ в окрестности Земли.

Перейдём к оценке ожидаемых потоков \bar{n} и \bar{p} , рождённых переходами (9). Из экспериментов с реакторными холодными нейтронами [3] получено, что период свободных НАО $T_0 > 0,86 \cdot 10^8$ с. Если принять это предельное значение для периода осцилляций за основу, то из формулы (7) следует значение $\delta \approx 1 \cdot 10^{-23}$ эВ. Поскольку индукция магнитного поля B в среде СКЛ порядка $5 \cdot 10^{-5}$ Гс, а $\mu B \approx 3 \cdot 10^{-16}$ эВ, то в формуле (8) $(\mu B)^2 \gg \delta^2$. Кроме того, в этой среде согласно (8) период осцилляций $T = \pi/(\mu B) \approx 7$ с, тогда как время t пролёта нейтрона с энергией $E = 100$ МэВ составляет $1 \cdot 10^3$ с, т. е. $T \ll t$. В таком случае, полагая в формуле (8) $\langle \sin^2 \mu B t \rangle = 1/2$, получим

$$P(n \rightarrow \bar{n}) = \frac{\delta^2}{2(\mu B)^2} e^{-\Gamma t}. \quad (10)$$

Эта формула определяет вероятность превращения нейтрона в антинейтрон на пути от Солнца к Земле.

Вероятность образования антипротонов в результате цепочки переходов (9) определяется соотношением

$$P(n \rightarrow \bar{n} \rightarrow \bar{p} e^+ \nu_e) = \int_0^t P_{n \rightarrow \bar{n}}(t') \Gamma dt' = \frac{\delta^2}{2(\mu B)^2} (1 - e^{-\Gamma t}). \quad (11)$$

Из формул (10) и (11) следует, что магнитное поле сильно подавляет переходы (9). Интенсивности протекания этих процессов на поверхности Земли и в СКЛ связаны соотношением $I_E/I_{c-r} = (B_{c-r}/B_E)^2 \propto 10^{-8}$.

Результаты вычислений ожидаемых потоков \bar{n} и \bar{p} в окрестности Земли представлены в таблице. Здесь $I(\bar{n})/I(n)$ и $I(\bar{p})/I(n)$ есть ожидаемые отношения потоков антинуклонов в окрестности Земли к исходному потоку нейтронов с энергией E .

Согласно данным, приведённым в таблице, при низких энергиях (около 10 МэВ) в потоке антинуклонов должны преобладать антипротоны. Однако с увеличением энергии доля антинейтронов возрастает. При энергиях выше 100 МэВ их присутствие СКЛ должно быть примерно одинаковым с антипротонами. В целом доля антинуклонов в окрестности Земли с ростом энергии падает.

Что касается потока нейтронов в СКЛ, он убывает по степенному закону [6]: $I \propto E^{-5,5}$. Таким образом, присутствие антинейтронов и антипротонов должно доминировать в низкоэнергетической области излучения.

Потоки \bar{n} и \bar{p} в окрестности Земли

E , МэВ	$I(\bar{n})/I(n)$	$I(\bar{p})/I(n)$	$(I(\bar{n}) + I(\bar{p}))/I(n)$
10	$0,1 \cdot 10^{-16}$	$6,0 \cdot 10^{-16}$	$6,1 \cdot 10^{-16}$
100	$1,6 \cdot 10^{-16}$	$3,5 \cdot 10^{-16}$	$5,1 \cdot 10^{-16}$
1000	$2,2 \cdot 10^{-16}$	$0,9 \cdot 10^{-16}$	$3,1 \cdot 10^{-16}$

4. Заключение. Уже около 30 лет ведутся поиски процессов с несохранением БЗ. Возможности их наблюдения в земных лабораториях исчерпываются. СКЛ могут предоставить дополнительные возможности для исследований в

этой области. Следует заметить, что нейтринные осцилляции были открыты именно в нейтринных потоках, идущих от Солнца.

Автор благодарен организационному комитету конференции, лаборатории математической физики СамГУ за поддержку и исключительно благоприятные условия, в которых проходила Вторая международная конференция.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Weinberg S.* The decay of the proton // *Scientific American*, 1981. Vol. 244. Pp. 64–75; русск. пер.: *Вайнберг С.* Распад протона // *УФН*, 1982. Т. 137, № 1. С. 151–172.
2. *Окунь Л. Б.* Лептоны и кварки. М.: Наука, 1990. 243 с.; англ. пер.: *Okun L. B.* Leptons and Quarks. Amsterdam, New York: North-Holland, 1982. 362 pp.
3. *Yao W.-M. et. al.* Review of Particle Physics // *J. Phys. G*, 2006. Vol. 33, no. 1, 1. 1232 pp.
4. *Kerbikov B. O., Kudryavtsev A. E., Lensky V. A.* Neutron–antineutron oscillations in a trap revisited // *JETP*, 2004. Vol. 98, no. 3. Pp. 417–426; *ЖЭТФ*, 2004. Т. 125, № 3. С. 476–485.
5. *Ignatovich V.* On $n-\bar{n}$ oscillation of ultracold neutrons // *Phys. Rev. D.*, 2003. Vol. 67, no. 1, 016004. 8 pp.
6. *Debrunner H., Lockwood J. A., Ryan J. M.* Solar neutron and proton production during the 1990 May 24 cosmic-ray flare increases // *ApJ*, 1993. Vol. 409, no. 2. Pp. 822–829.
7. *Debrunner H. et. al.* Energetic neutrons, protons, and gamma rays during the 1990 May Solar cosmic-ray event // *ApJ*, 1997. Vol. 479, no. 2. Pp. 997–1011.
8. *Котов Ю. Д.* Высокоэнергичные вспышечные процессы на Солнце и их исследование на российских спутниках КОРОНАС // *УФН*, 2010. Т. 180, № 6. С. 647–661; англ. пер.: *Kotov Yu. D.* High-energy solar flare processes and their investigation onboard Russian satellite missions CORONAS // *Phys. Usp.*, 2010. Vol. 53, no. 6. Pp. 619–631.

Поступила в редакцию 20/XII/2010;
в окончательном варианте — 11/III/2011.

MSC: 81V05, 81V22

THE $n-\bar{n}$ OSCILLATIONS IN NEUTRON FLUXES RUNNING FROM SUN TO EARTH

L. S. Molchatsky

Samara State Academy of Social Sciences and Humanities,
65/67, M. Gorkiy st., Samara, 443099, Russia.

E-mail: levmolchatsky@mail.ru

The process of $n-\bar{n}$ oscillations in the solar cosmic-rays is considered. It is shown that it has high intensity with respect to the analogic processes on the Earth ($I_{c-r}/I_{Earth} \propto 10^8$), because magnetic field strongly suppresses $n-\bar{n}$ oscillations. Energetic dependence of the \bar{n} and \bar{p} fluxes at the Earth is also found. Results obtained are argument for searching the $n-\bar{n}$ transitions in experiments with the solar cosmic-rays.

Key words: *neutron-antineutron oscillations, solar cosmic-rays.*

Original article submitted 20/XII/2010;
revision submitted 11/III/2011.

Lev S. Molchatsky (Ph. D. (Phys. & Math.)), Associated Professor, Dept. of Theoretical Physics.