

ОБ ОСЦИЛЛЯЦИЯХ НЕЙТРОН-АНТИНЕЙТРОН

*М.В. Казарновский, В.А. Кузьмин, Е.Г. Четыркин,
М.Е. Шапошников*

Предлагается эксперимент по поиску прямых переходов нейтрон-антинейтрон в вакууме с нарушением барионного числа, который может быть более чувствителен, чем эксперименты по поиску нестабильности протонов.

В последнее время интенсивно обсуждается возможная нестабильность протона, предсказываемая в ряде объединенных моделей сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Вообще говоря, некоторые модели наряду с распадом протона предсказывают и существование слабых нейтрон-антинейтронных осцилляций (переход $n \longleftrightarrow \bar{n}$). Последняя возможность интересна и сама по себе.

В настоящей работе предлагается эксперимент по поиску прямых переходов $n \longleftrightarrow \bar{n}$ с нарушением закона сохранения барионного числа¹⁾

В 1970 году один из авторов данной статьи (В.К.) исходя из необходимости объяснения барионной асимметрии Вселенной указал на важность экспериментальных поисков любых процессов с несохранением барионного числа, и, в особенности, процессов осцилляции $n \longleftrightarrow \bar{n}$ в вакууме [2]. Там же процесс $n \longleftrightarrow \bar{n}$ был рассмотрен феноменологически и сделаны оценки возможной скорости осцилляции.

¹⁾ Впервые, по-видимому, процесс осцилляции барионов упоминался в работе [1].

В идеализированном варианте схема эксперимента могла бы выглядеть следующим образом. Поток тепловых нейтронов от атомного реактора, пройдя в вакууме определенное расстояние R , попадает в мишень. Появление антинейтронов может быть обнаружено по вызываемой ими реакции аннигиляции в мишени.

Оценим чувствительность предлагаемого эксперимента. Эффективное взаимодействие, описывающее переходы $n \longleftrightarrow \bar{n}$ в вакууме, имеет вид

$$H_1 = \epsilon \bar{\psi}_n \psi_n + \text{э. с.}, \quad (1)$$

где ϵ — некоторый малый параметр размерности энергии, определяющий силу взаимодействия с $\Delta B = 2$ (B — барионное число), ψ_n и $\bar{\psi}_n$ — поля, соответствующие нейтрону и антинейтрону соответственно. Наличие магнитного поля Земли B приводит к замене эффективного гамильтониана (1) на

$$H_B = H_1 + \mu B (\bar{\psi}_n \psi_n - \bar{\psi}_n \psi_n^-), \quad (2)$$

где μ — магнитный момент нейтрона, $\mu = 6,02 \cdot 10^{-18}$ МэВ/Гс. Мы считаем, что спин нуклона параллелен магнитному полю B Земли; учет неполяризованности начального нейтрона не изменяет конечных результатов анализа.

Соответствующая взаимодействию (2) вероятность найти антинейтрон \bar{n} в момент времени t , если при $t = 0$ мы имели нейтрон n , равна

$$P(t) = \frac{\epsilon^2}{\epsilon^2 + (\mu B)^2} \sin^2 \left(\frac{[(\mu B)^2 + \epsilon^2]^{1/2}}{\hbar} t \right). \quad (3)$$

Поправки в формуле (3), обусловленные нестабильностью нейтрона, имеют порядок величины t/r , где $r \sim 10^3$ сек — время жизни нейтрона, и малы при $t \ll r$. Из (3) период осцилляций $n \longleftrightarrow \bar{n}$ при $B = 0$ равен $T = 2\pi\hbar/\epsilon$.

Получим ограничение на параметр ϵ , исходя из опытов по нестабильности нуклонов. Наличие осцилляций $n \longleftrightarrow \bar{n}$ приводило бы к замене нейтрона в ядре на антинейтрон с последующей его аннигиляцией с энергосвободением ~ 2 ГэВ. Во втором порядке теории возмущений с учетом затухания промежуточного состояния (или, что то же, унитарности) можно показать, что ширина Γ распада ядра в результате перехода $n \longleftrightarrow \bar{n}$ равна

$$\Gamma = \frac{\epsilon^2 \Gamma_{\text{анн}}}{(\Delta M)^2 + \left(\frac{\Gamma_{\text{анн}}}{2} \right)^2} (A - Z), \quad (4)$$

где $\Gamma_{\text{анн}}$ — ширина распада "квазиядра", в котором один из нейтронов заменен антинейтроном, $(A - Z)$ — количество нейтронов в ядре, ΔM — разность энергий нейтрона и антинейтрона в ядре.

Поскольку из экспериментов по поиску нестабильности протона известно, что [3]

$$\frac{\hbar}{\Gamma} \gg \frac{\hbar}{A\Gamma_0} \approx \frac{10^{30}}{A} \text{ лет,}$$

то при $\Gamma_{\text{анн}} \gg \Delta M \sim 10 \text{ МэВ}$

$$\epsilon \lesssim \frac{1}{2} \left[\frac{A}{A-Z} \Gamma_0 \Gamma_{\text{анн}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Если взять для оценки $A = 2Z$, $\Gamma_{\text{анн}} \sim 100 \text{ МэВ}$ [4], то из стабильности ядер следует $\epsilon \lesssim 10^{-29} \text{ МэВ}$ или $T \gg 4 \cdot 10^8 \text{ сек}$. Трудно указать эффект, который мог бы изменить эти оценки более, чем на порядок.

Аналогичная оценка была получена в [2].

Теперь мы рассмотрим вопрос, можно ли улучшить ограничение на силу взаимодействия с $\Delta B = 2$ в прямых экспериментах по поиску $n \longleftrightarrow \bar{n}$ перехода. Поскольку практически всегда $\mu B \gg \epsilon$, из (3) следует, что в мишень попадает максимальное количество антинейтронов при условии

$$\frac{\mu B R}{v\hbar} \lesssim 1, \quad (6)$$

где v — средняя скорость нейтронов, т.е. для тепловых нейтронов при $BR \lesssim 0,25 \text{ Гс} \cdot \text{м}$.

Из (6) видно, что для оптимизации эксперимента при длине пробега нейтронов $\sim 10 \text{ м}$ достаточно взять $B \sim 0,025 \text{ Гс}$, что соответствует уменьшению магнитного поля Земли лишь в 20 раз.

При длине трубы $\sim 10 \text{ м}$ вероятность превращения нейтрона в антинейтрон составляет при $\epsilon = 10^{-29} \text{ МэВ}$

$$P = \frac{\bar{n}}{n} = \left(\frac{\epsilon R}{v\hbar} \right)^2 \approx 10^{-20}.$$

Таким образом, для того, чтобы продвинуться в ограничении на силу взаимодействия с $\Delta B = 2$ дальше, чем это достигнуто в настоящее время в экспериментах по поиску нестабильности нуклона [3], необходимо достигнуть чувствительности предлагаемого эксперимента лучшей, чем 10^{-20} .

По нашему мнению, предлагаемый эксперимент является важным независимым направлением по поиску взаимодействий, несохраняющих барионное число, и не исключено, что он может иметь большую чувствительность чем эксперимент по поиску нестабильности нуклонов.

Настоящая работа была доложена на совещании "Проблема стабильности протона" (Москва, 16 – 17 января 1980 г.).

Авторы благодарны Г.Т.Зацепину, Я.Б.Зельдовичу, А.Ю.Игнатьеву, Д.А.Киржницу, М.А.Маркову, В.А.Матвееву, Б.М.Понтекорво, Ф.Райнесу, И.И.Ройзену, В.А.Рубакову, П.Е.Спиваку, А.Н.Тавхелидзе, А.Е.Чудакову за полезные обсуждения. Один из авторов (В.К.) хотел бы выразить бла-

годарность И.М.Железных, отметившему в 1970 г. в дискуссии с ним необходимость учитывать осцилляцию $n \longleftrightarrow \bar{n}$ в случае несохранения барионного заряда.

После того, как данная работа была закончена, мы узнали о работе [5], где проведено аналогичное обсуждение, но получены несколько отличающиеся оценки. Мы благодарны Р.Е.Маршаку и Р.Н.Мохапатре за информацию об этой работе.

Институт ядерных исследований
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 июня 1980 г.

Литература

- [1] M.Gell-Mann, A.Pais. Phys. Rev., 97, 1387, 1955.
 - [2] В.А.Кузьмин. Письма в ЖЭТФ, 13, 335, 1970; Препринты ФИАН №116 и №140, 1970.
 - [3] J.Learned, F.Reines, A.Soni. Phys. Rev.Lett., 43, 907, 1979.
 - [4] И.С.Шапиро. УФН, 109, 431, 1973.
 - [5] R.N.Mohapatra, R.E.Marshak. Preprint VPI-HEP-80/4, April, 1980.
-