

К ВОПРОСУ О ГАЗЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ В ЛОВУШКЕ

*А.В. Антонов, А.Н. Исаков, М.В. Казарновский,
В.Е. Солодилов*

На возможность хранения нейтронного газа в ловушках впервые указали Зельдович [1] и Владимирский [2], но детально поведение такого газа в ловушке не рассматривалось. В данной работе исследуются некоторые факторы, влияющие на длительность хранения газа ультрахолодных нейтронов (УХН) в ловушках, определяются требования к ловушкам и предлагается метод получения УХН непосредственно в ловушке [3]. Впервые экспериментально наблюдал УХН Ф.Л. Шапиро с сотрудниками [4].

Прежде всего рассмотрим эффект поглощения УХН. Пусть в ловушке объемом Ω имеется "черный" поглотитель, например, счетчик нейтронов, площадью S . Тогда при коэффициенте отражения нейтронов от

стенки $R = 1$ получим, что число N_v -нейтронов со скоростью v убывает со временем t по закону

$$N_v = N_{0,v} = \exp \left\{ - \left(\lambda + \frac{Sv}{4\Omega} \right) t \right\}, \quad (1)$$

где λ – константа распада свободных нейтронов. При этом

$$v \leq v_{\text{Гр}} \equiv \frac{\hbar}{m} \sqrt{\frac{1}{\pi} N b_{\text{ког}}}, \quad (2)$$

где N – число ядер в единице объема стенок ловушки, $b_{\text{ког}}$ – когерентная длина рассеяния, m – масса нейтрона. Из (1) следует, что "черный" поглотитель даже малой площади существенно снижает время жизни нейтронов в ловушке, что не противоречит эксперименту [4]. Принимая в момент накопления ($t = 0$) спектр УХН $N_{0,v} \sim v^3$ ($v_{\text{Гр}}$ много меньше средней тепловой скорости v_T , получим зависимость отношения средней скорости \bar{v} нейтронов в ловушке к граничной $v_{\text{Гр}}$ от $\alpha = \frac{Sv_{\text{Гр}}t}{4\Omega}$ (рис. 1).

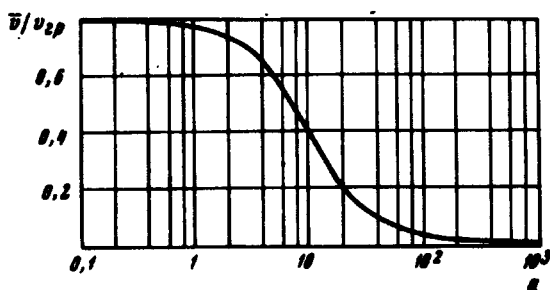


Рис. 1. Зависимость $\bar{v}/v_{\text{Гр}}$ от параметра α ($\alpha = Sv_{\text{Гр}}t/4\Omega$)

При $t \rightarrow \infty$ $\bar{v} \rightarrow 0$; этот эффект аналогичен диффузионному охлаждению нейтронов, если "коэффициент теплопередачи" от замедлителя к нейтронам положить равным 0.

Коэффициент отражения от среды R в пренебрежении неупругим рассеянием можно представить в виде

$$R = \left| \frac{k - k_0}{k + k_0} \right|^2, \quad (3)$$

где k_0 и k – нормальная компонента волнового вектора соответственно в вакууме и среде. Ограничиваясь случаем не слишком сильного пог-

лощения [5, 6], получим:

$$R = \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{v_{\text{ГР}}^2}{v_0^2} - 1\right)^2 + \frac{u^4}{v_0^4}} - \sqrt{2 \left[\sqrt{\left(\frac{v_{\text{ГР}}^2}{v_0^2} - 1\right)^2 + \frac{u^4}{v_0^4}} - \frac{v_{\text{ГР}}^2}{v_0^2} + 1 \right]}}{1 + \sqrt{\left(\frac{v_{\text{ГР}}^2}{v_0^2} - 1\right)^2 + \frac{u^4}{v_0^4}} + \sqrt{2 \left[\sqrt{\left(\frac{v_{\text{ГР}}^2}{v_0^2} - 1\right)^2 + \frac{u^4}{v_0^4}} - \frac{v_{\text{ГР}}^2}{v_0^2} + 1 \right]}} \quad (4)$$

где $u = \sqrt{\frac{\hbar}{m} N v \sigma_a(v)}$, а $\sigma_a(v)$ — эффективное сечение поглощения нейтронов. В предположении изотропного распределения скоростей падающих нейтронов, пользуясь (5), вычислим коэффициент отражения \bar{R} нейтронов с полной скоростью v , усредненной по углам падения:

$$\bar{R} = 1 - c \frac{v}{v_{\text{ГР}}} \frac{1}{1 + \sqrt{1 - (v/v_{\text{ГР}})^2}}, \quad c = \frac{2u^2}{v_{\text{ГР}}^2} \quad (5)$$

Не трудно видеть, что время жизни нейтронов из-за поглощения в стенках должно уменьшаться в $\sim 1 + \frac{v[1 - \bar{R}(v)]S}{4\Omega\lambda}$ раз по сравне-

нию со случаем, когда $R = 1$ (S_0 — площадь внутренней поверхности ловушки). В медной сферической ловушке ($d = 20$ см) при $v_{\text{ГР}}/v$ равном трем, время жизни уменьшается в ~ 2 раза; в такой же ловушке из Be при $v = v_{\text{ГР}} = 6,8$ м/сек — только на $\sim 4\%$. Следовательно, нейтронный газ целесообразно хранить в ловушках из материалов с малым поглощением (Be, C и т. п.). Вещества со значительным поглощением пригодны для нейтронпроводов и зеркал (Cu, Fe, Ni, Al, Au и т. п.). Поглощение в стенках ловушки должно, очевидно, смягчать спектр нейтронов.

Накопление нейтронов при облучении "окна" ловушки стационарным потоком УХН должно сопровождаться значительным их оттоком через это "окно". В ловушке с $\Omega = 10^5$ см³ и площадью "окна" $S = 10^2$ см² среднее время жизни нейтронов уменьшается в ~ 100 раз. В эксперименте [4] использовалась ловушка в виде медной трубы диаметром ~ 10 см и длиной 10,5 м (внутренняя поверхность $\sim 3 \cdot 10^4$ см²). Эмит-

1) Для Cu, Al, Be и C с соответственно равно $2,95 \cdot 10^{-4}$; $3,47 \cdot 10^{-3}$; $0,59 \cdot 10^{-6}$ и $0,415 \cdot 10^{-6}$.

тером УХН служила полиэтиленовая пленка площадью $\sim 70 \text{ см}^2$, закрывавшая торец этой трубы. Отток нейтронов через эмиттер, по-видимому, существенно снижал наблюдаемую интенсивность УХН (составлявшую в этих опытах $0,76 \cdot 10^{-2}$ УХН/сек при фоне $\sim 25\%$). Устранить отток можно, закрывая "окно" ловушки заслонкой, отражающей УХН. Это целесообразно и легко осуществимо при работе с импульсным источником нейтронов "однократного" действия (ТРИГА [7] или ИИН [8], которые за вспышку длительностью 2–3 мсек дадут $\sim 10^{18}$ нейтронов) или с источниками, работающими с частотой меньше $\sim 10 \text{ гц}$. Стационарный источник, по-видимому, больше подходит для формирования пучков УХН с помощью зеркальных нейтронотводов.

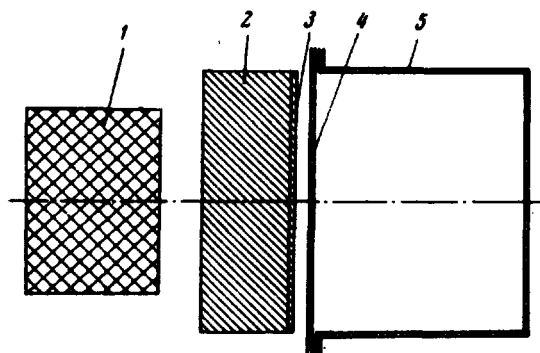


Рис. 2. Схема установки для накопления газа из ультрахолодных нейтронов: 1 - импульсный источник нейтронов, 2 - водородосодержащий замедлитель, 3 - внешний тонкий слой замедлителя - эмиттер УХН, 4 - механический быстродействующий затвор, 5 - контейнер-ловушка УХН

Рис. 2 поясняет предлагаемый метод накопления УХН. Источник нейтронов 1 облучает водородосодержащий замедлитель 2; из него из слоя 3 (толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$) образующиеся УХН вытекают в контейнер 5. После того, как этот процесс в основном закончится, срабатывает нейтронный затвор 4, замыкающий УХН в контейнере 5. Его размеры должны быть такими, чтобы за среднее время пролета нейтронами расстояния от замедлителя до стенки контейнера и обратно успел сработать затвор.

Рассмотрим эффективность метода. В потоке, вытекающем из замедлителя, доля нейтронов с $v \leq v_{\text{Гр}}$ равна $\frac{1}{2} \left(\frac{v_{\text{Гр}}}{v_T} \right)^4$, что при комнатной температуре ($v_{\text{Гр}} = 6,8 \text{ м/сек}$) составляет $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ [9]. Если облучение производится быстрыми нейтронами, то в грубой оценке по воз-

растной теории вероятность вытекания термализованного нейтрона $\epsilon = e^{-B^2 \tau B^2 L^2 / (1 + B^2 L^2)}$ (τ — возраст нейтрона, L — длина диффузии; для замедлителя в форме куба со стороной $2a$ $B^2 = \frac{3}{4}(\pi/a)^2$). Для водородосодержащего замедлителя ($\tau = 33 \text{ см}^2$, $f = 2,7 \text{ см}$) $\epsilon \approx 3 \cdot 10^{-2}$ (при $a = 20 \text{ см}$), то-есть, эффективность генерации УХН составит $\sim 10^{12}$ на один быстрый нейтрон, попавший в замедлитель; охлаждение замедлителя до гелиевой температуры должно увеличить эффективность генерации УХН на ~ 2 порядка. Если применить в качестве эмиттеров УХН ряд тонких слоев замедлителя, то можно довести эффективность генерации УХН до $\sim 10^{-2}$. При использовании реакторов [7, 8] за цикл можно накопить до $\sim 10^9$ УХН. Ловушку с накопленным нейтронным газом можно перемешать со скоростью $v_d \ll v_{гр}$.

Таким образом, применение многослойного охлаждаемого до низких температур эмиттера должно увеличить выход УХН на несколько порядков. Использование нейтронного затвора, устраняющего отток нейтронов через эмиттер, должно дополнительно повысить плотность нейтронного газа приблизительно на два порядка; если при этом внутренние стенки ловушки покрыть материалом слабо поглощающим нейтроны (бериллий, графит), то время жизни УХ нейтронов в ней практически будет определяться их естественным распадом.

В заключение авторы благодарят за участие в обсуждении работы Ю.А.Меркулева, Б.В.Гранаткина и Во Дак Банга.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 июля 1969 г.
После переработки
13 сентября 1969 г.

Литература

- [1] Я.Б.Зельдович. ЖЭТФ, 36, 1952, 1959.
- [2] В.В.Владимирский. ЖЭТФ, 39, 1062, 1960.
- [3] А.В.Антонов, А.И.Исаков, М.В.Казарновский, В.Е.Солодилов. Препринт ФИАН №98, 1969.
- [4] В.И.Лушиков, Ю.Н.Покотиловский, А.В.Стрелков, Ф.Л.Шапиро. Письма в ЖЭТФ, 9, 40, 1969.
- [5] А.И.Ахиезер, И.Я.Померанчук. Некоторые вопросы теории ядра, ОГИЗ, 1948.
- [6] И.И.Гуревич, П.Э.Немировский. ЖЭТФ, 41, 1175, 1961.

- [7] A.P.Graff et al.; TRIGA – A High Performance Steady State Pulsing Reactor, Report – GA-7259, September, 1966.
- [8] А.И.Смирнов, В.М.Талызин, В.Е.Хвостюнов. Препринт ИАЭ, №1200, 1962.
- [9] А.В.Антонов, Д.Е.Вуль, М.В.Казарновский. Письма в ЖЭТФ, 9, 307, 1969.
-