

25

ВОЗМОЖНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ ПУТЕМ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ДВИЖУЩИХСЯ ЗЕРКАЛ

А.В. Антонов, Д.Е. Вуль, М.В. Казарновский

Когда на среду с заметной положительной длиной когерентного рассеяния нормально падают из вакуума нейтроны со скоростью, меньшей некоторой $v_{гр} \approx 5 - 6$ м/сек, то они испытывают зеркальное отражение [1 - 4]. Такие нейтроны мы будем называть ультрахолодными (УХН).

Исследования с УХН представляют значительный интерес [5, 9]. Однако их доля в нейтронных потоках из замедлителей крайне мала. Ниже обсуждается возможность получения УХН путем замедления более быстрых нейтронов серией последовательных отражений от соответствующим образом движущихся зеркал. Мы покажем, что в случае импульсного источника таким методом можно существенно повысить выход УХН из нейтронных потоков.

Зеркальное отражение нейтронов от сред будет иметь место, когда нормальная к поверхности компонента скорости нейтрона относительно "зеркала" $v_{\perp}^{(отн)}$ не превосходит $v_{гр}$.

Пусть v и u — соответственно скорости нейтрона и зеркала, а n — единичный вектор внешней нормали к отражающей поверхности среды. Тогда $v_{\perp}^{(отн)} = n v - u$, и, как легко проверить, после отражения нейтрон будет иметь скорость

$$v' = v + 2n(nu - nv).$$

Поскольку $v_{\perp}^{(отн)} < v_{гр}$ максимальное уменьшение скорости равно $2v_{гр}$. Таким образом, заставляя нейтрон последовательно отражаться от надлежащим образом движущегося зеркала (или системы зеркал), можно постепенно понизить его скорость до сколь угодно малых значений. Отметим, что минимальное число отражений n_{min} , необходимых для полного замедления нейтрона со скоростью v равно $v/2v_{гр}$; в частности, если $v = 2000$ м/сек, $n_{min} \sim 10^2$.

Поскольку в реальных условиях число отражений может значительно превосходить это значение, весьма важным является вопрос о макси-

мальном числе возможных зеркальных отражений нейтронов от таких зеркал без заметной потери интенсивности. К сожалению, надежных теоретических оценок этой величины пока не получено. В эксперименте Шапиро и др. [8] время жизни УХН в трубе из меди диаметром ~ 10 см больше 200 сек. За это время нейтроны должны испытать $\sim 10^4$ соударений со стенками. Конечно с ростом скорости нейтрона следует ожидать уменьшения коэффициента отражения за счет эффектов, связанных с качеством поверхности (диффузного рассеяния и неупругого взаимодействия нейтронов с колебаниями атомов, локализованных вблизи поверхности). Однако уже опубликованные результаты [6, 7] позволяют надеяться, что создание зеркал, обладающих достаточно высоким коэффициентом отражения нейтронов является технически осуществимой задачей (отметим, что эффект неупругого взаимодействия может быть значительно уменьшен охлаждением зеркал).

Рассмотрим два варианта систем движущихся зеркал.

Пусть нейтрон скорости v летит перпендикулярно поверхности плоского зеркала, движущегося замедленно в том же направлении (см. рис. 1), и пусть в момент их столкновения скорость зеркала была u .

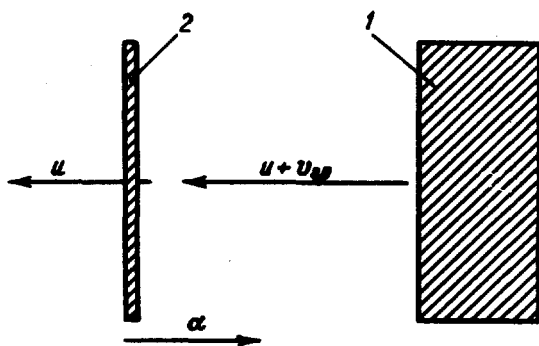


Рис. 1. Схема установки для получения УХН методом последовательных отражений нейтронов, падающих нормально на плоское замедленно движущееся зеркало. 1 — импульсный источник холодных нейтронов; 2 — замедленно движущееся плоское нейтронное зеркало; u — скорость зеркала; a — ускорение зеркала

Нейтрон отразится, если $v - u \equiv \Delta < v_{гр}$, и его скорость уменьшится на 2Δ . Если зеркало движется равнозамедленно с ускорением $-a$, то через время $t_1 = 2[(v - u)/a] = 2\Delta/a$ нейтрон вторично столкнется с

зеркалом. При этом его скорость будет превышать скорость зеркала на ту же величину Δ , что и при первом соударении, поэтому после второго соударения скорость нейтрона снова упадет на величину 2Δ . Замедление закончится, когда число соударений n_0 нейтрона с зеркалом будет удовлетворять условию $v - 2(v - u)n_0 < \Delta < v_{гр}$; при $v \gg v_{гр}$ получим $n_0 = u/2\Delta$ и весь процесс замедления займет время $t_n = 2\Delta n_0/a = u/a$.

Установка, работающая по данному методу, должна включать в себя в качестве основных узлов плоское нейтронное зеркало, совершающее возвратнопоступательное движение, и импульсный источник холодных нейтронов, синхронизированный с движением этого зеркала.

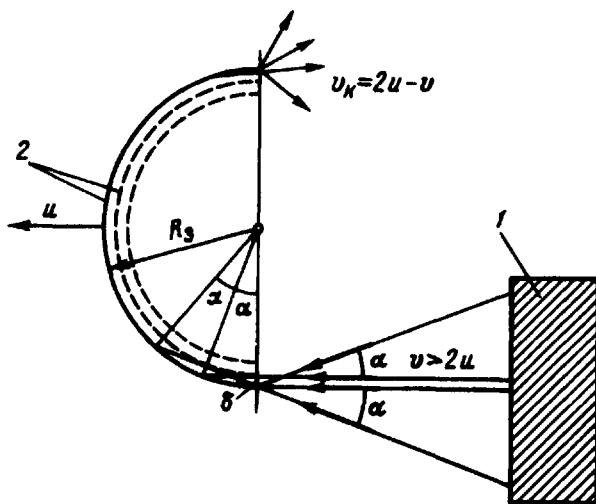


Рис. 2. Схема установки для получения УХН методом последовательного отражения нейтронов от сферического равномерно движущегося зеркала. 1 – импульсный источник холодных нейтронов; 2 – система концентрических равномерно движущихся со скоростью u нейтронных зеркал; R_z – радиус нейтронного зеркала; v – скорость нейтрона; $v_k = 2u - v$ – скорость нейтронов при вылете из зеркал; $\alpha = \arctg [v_{гр}/(v - u)]$ – предельный угол скольжения нейтронов отражающихся от зеркал в системе координат, связанной с зеркалом; δ – зазор между соседними зеркалами

Для получения УХН (при $v \gg v_{гр}$) можно использовать нейтроны, летящие лишь в узком телесном угле вблизи нормали к поверхности зеркала в среднем (при изменении Δ от 0 до $v_{гр}$) равном

$$d\Omega_{эфф} = \pi/3(v_{гр}/v)^2.$$

В качестве следующего варианта рассмотрим последовательное отражение нейтрона от кривого равномерно движущегося зеркала (см. рис. 2). Пусть нейтроны из источника падают на зеркало по направлениям, близким к его оси со скоростями, отличающимися от его удвоенной скорости не более чем на $v_{ГР}$, т.е. $v_{ГР} \geq |v - 2v|$. Условие $v(отн) = v_{ГР}$ выполняется только для нейтронов, соударяющихся с периферической частью зеркала, образующей эффективную поверхность в виде узкого кольца шириной $\delta = 2R_3 v_{ГР}^2 / v^2$, где R_3 — радиус зеркала. Если первое соударение нейтрона с зеркалом упругое, то и последующие соударения будут упругими. В результате каждого упругого соударения с зеркалом относительная скорость нейтрона $v_{отн}$ будет поворачиваться на угол 2α , где α — угол между скоростью нейтрона перед первым соударением и касательной к зеркалу в точке этого соударения. В результате $k \approx \pi/2\alpha$ упругих соударений вектор относительной скорости нейтрона повернется на угол близкий к π и нейтрон покинет зеркало со скоростью $v_k = 2v - v$. Для увеличения "светосилы" такого рода установки следует использовать систему зеркал в виде набора концентрических полусфер. Поступательное движение зеркала может быть заменено вращением по радиусу $\rho \gg R_3$. Как показывают оценки, средняя эффективная угловая ширина нейтронного пучка, в пределах которой таким методом образуются УХН, равна

$$\delta \Omega_{эфф} = 4\pi/9(v_{ГР}/v)^2.$$

Технически осуществимой является следующая установка: на колесе радиуса $\rho = 50$ см, вращающемся с частотой 4000 об/мин ($v \approx 200$ м/сек), расположены зеркала с $R_{3max} = 2$ см.

Рассмотрим вопрос о том на сколько можно повысить поток УХН, получаемых изложенным выше методом, по сравнению с долей УХН в потоках нейтронов из замедлителей. Будем считать, что поток вытекающих из замедлителя нейтронов имеет вид:

$$N(v)dv = 2(v^3/v_T^4)e^{-v^2/v_T^2} dv$$

($v_T = \sqrt{2kT/m}$, T — температура среды, k — постоянная Больцмана). Нормировочная постоянная выбрана из условия $\int_0^\infty N(v)dv = 1$. Доля УХН в таком спектре равна $N_0 \equiv \int_0^{v_{ср}} N(v)dv = 1/2(v_{ГР}/v_T)^2$. В случае комнатной температуры эта величина составляет $3 \cdot 10^{-11}$, а — гелиевой — $2 \cdot 10^{-7}$.

Ранее было показано, что при получении УХН отражением от зеркал замедляется узкая часть спектра нейтронов в интервале от некоторой скорости v до $v + v_{гр}$. При этом удается замедлить нейтроны, летящие в узком телесном угле: $d\Omega_{эфф} \sim (v_{гр}/v)^2$. Окончательный выигрыш в потоке УХН по сравнению с их долей в потоке из замедлителя равен

$$q = \frac{d\Omega_{эфф}}{2\pi} \frac{1}{N_0} \int_v^{v+v_{гр}} N(v) dv \sim \frac{v}{v_{гр}}.$$

При $v = 2 \cdot 10^3$ м/сек $q = 300$.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность Ю.А. Меркульеву и В.Е. Солодилову за помощь в работе и М.И. Подгорецкому за плодотворное обсуждение проблемы и ценные советы. Авторы также благодарны А.И. Исакову, Д.А. Киржницу, Ф.Л. Шапиро и И.В. Штрапиху за интерес к работе и полезные замечания.

Поступило в редакцию
13 января 1969 г.

Литература

- [1] А.И. Ахиезер, И.Я. Померанчук. Некоторые вопросы теории ядра, ОГИЗ, 1948.
- [2] А.И. Ахиезер, И.Я. Померанчук. ЖЭТФ, 18, 495, 1948.
- [3] Я.Б. Зельдович. ЖЭТФ, 33, 1488, 1957.
- [4] К.В. Владимирский. ЖЭТФ, 39, 1062, 1960.
- [5] Ф.Л. Шапиро. УФН, 95, 146, 1968.
- [6] В. Alefeld und and. Neutronenleiter. Preprint KFA Bericht, JÜL-294-NP.
- [7] P. D. Miller at all. Phys. Rev. Lett., 19, 381, 1967.
- [8] В.И. Лушиков, Ю.Н. Покотиловский и др. Письма в ЖЭТФ, 9, 40, 1969.
- [9] И.И. Гуревич, Л.В. Тарасов. Физика нейтронов низких энергий. М., Изд. Наука, 1965.