

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ42Г1

Ф-833

18/VIII-75

P4 - 8851

3007/2-75

И.М.Франк

О ВОЗМОЖНОЙ ПРИЧИНЕ АНОМАЛИИ
ВО ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

1975

P4 - 8851

И.М. Франк

О ВОЗМОЖНОЙ ПРИЧИНЕ АНОМАЛИИ
ВО ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Как показали многочисленные эксперименты, время хранения ультрахолодных нейтронов в замкнутых сосудах меньше теоретически ожидаемого ^{/1,2/}. По-видимому, вклад этого эффекта аномальной убыли нейтронов в пределах ошибок опыта одинаков во всех исследованных случаях. Связанное с ним исчезновение ультрахолодного нейтрона происходит, если отнести его на одно соударение со стенкой, с вероятностью, равной примерно $3 \cdot 10^{-4}$. Поскольку эта вероятность не зависит заметным образом от величины сечения захвата нейтронов и эффект особенно отчетливо проявляется в веществах с малым поглощением, то трудно себе представить, что аномалия вызвана захватом нейтронов. В самом деле, в этом случае пришлось бы допустить какой-то дополнительный механизм распада или поглощения нейтронов, отличный от всех известных /если, конечно, отражающая поверхность чистая, т.е. на ней нет поглощающей нейтроны пленки/.

Гораздо более вероятно, что существует аномальный механизм нагрева нейтронов. В самом деле, нельзя быть заранее уверенным, что теория правильно учитывает все возможные механизмы нагрева нейтронов, особенно, когда речь идет о нейтронах практически нулевой энергии.

Если исходить из экспериментальных данных, то такой дополнительный механизм нагрева должен быть специфическим для ультрахолодных нейтронов. В самом деле, сечение неупругого рассеяния для очень холодных нейтронов, по-видимому, не отличается от ожидаемого ^{/3/}. Основанное на этом допущение уже было сделано автором ранее и феноменологическое рассмотрение содержится в лекции на Второй международной школе по нейтронной физике в Алуште ^{/4/}. Предположение об аномальном эффекте исчезновения ультрахолодных нейтронов будет

выполнено, если допустить, что взаимодействие связано с процессом, происходящим в поверхностном слое отражающего нейтроны вещества. Простейшим является допущение о наличии поглощающих нейтроны примесей в поверхностной пленке. Однако в этом случае эффект вряд ли был бы универсальным. Второе предположение, которое может быть сделано, состоит в учете влияния того, что отражение нейтронов происходит не от идеально зеркальной поверхности. В связи с этим рассматривалась роль неровностей на отражающей нейтроны поверхности /5/. Однако этот путь объяснения аномалии пока не привел к решению проблемы. Отражение ультрахолодных нейтронов не обязательно является идеально упругим. При этом, однако, нет надежных экспериментальных данных, позволяющих определить, как размывалась бы линия моноэнергетических ультрахолодных нейтронов в результате отражения. Вместе с тем даже небольшое размытие энергии, незаметное для очень холодных нейтронов, может оказаться существенным для ультрахолодных нейтронов /4/. В любом случае не исключено, что с малой вероятностью нейтрон при отражении сразу получает энергию выше пороговой. В связи с этим заслуживает рассмотрения роль дифракции нейтронов на бегущих поверхностных волнах вещества. Хотя на предварительной стадии обсуждения совместно с Ф.Л.Шапиро казалось, что с количественной стороны она не может дать должного эффекта, все же, по-видимому, рационально обсудить этот вопрос вновь. Поскольку коэффициент отражения велик только для ультрахолодных нейтронов, то все эффекты, связанные с отражением, очевидно, будут специфическими только для них.

Для рассмотрения перейдем в систему координат, в которой волна неподвижна, т.е. в систему, движущуюся со скоростью волны v_a . Эта скорость v_a , порядка 10^5 см/сек велика по сравнению с максимальной пороговой скоростью ультрахолодного нейтрона - $v_0 \sim 10^2$ см/сек. Поэтому в движущейся системе координат угол ϕ между скоростью нейтрона и отражающей плоскостью мал /см. рис. 1/.

$$\operatorname{tg} \phi = \sin \phi = \frac{v_z}{v_a}, \quad /1/$$

где v_z - компонента скорости нейтрона по нормали к поверхности, а компонентой скорости v_x вдоль поверхности можно пренебречь, т.к. $v_x \ll v_0$. Этот угол ϕ меньше или равен углу ϕ_0 , который определяется пороговой скоростью /см. рис. 1/

$$\sin \phi \leq \sin \phi_0 = \frac{v_0}{v_a}, \quad /2/$$

где $\phi_0 \sim 10^{-3}$.

При отсутствии поверхностной волны, очевидно, будет только зеркальное отражение под тем же углом ϕ к плоскости. При наличии поверхностной волны в отражении должны наблюдаться дифракционные максимумы. Максимум первого порядка будет наблюдаться для угла ϕ' , который может быть найден из простых геометрических соображений /см. рис. 2/.

$$r' - r'' = \lambda, \quad /3/$$

где λ - длина волны нейтрона в движущейся системе координат, а r' и r'' равны:

$$r' = \lambda_a \cos \phi \quad \text{и} \quad r'' = \lambda_a \cos \phi'. \quad /4/$$

Здесь λ_a - длина волны поверхностных волн. Отсюда *

$$\cos \phi' = \cos \phi - \frac{\lambda}{\lambda_a} \approx 1 - \frac{\lambda}{\lambda_a}, \quad /5/$$

поскольку $\cos \phi$ практически равен единице.

Таким образом, в движущейся системе координат нейтрон может рассеяться с той же скоростью v_a , но под

* Формула $\sin \theta' - \sin \theta = \pm \lambda / \lambda_a$, где θ' и θ - углы скольжения т.ч. $\sin \theta = \cos \phi$, использовалась еще Ралеем при рассмотрении отражения света от волн на поверхности вещества. При этом отмечалось, что эффект должен быть не очень мал, несмотря на малую амплитуду волн. Этот вопрос обсуждается в работе 1913 г. Л.И.Мандельштамом /6/. В формуле /5/ нами выбран знак минус перед λ / λ_a , поскольку $\cos \phi$ близко к единице.

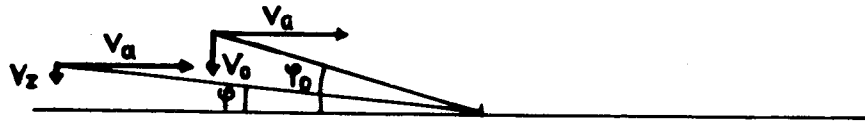


Рис. 1

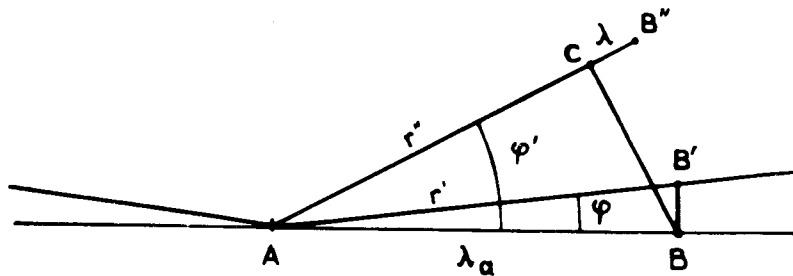


Рис. 2

углом ϕ' . При переходе в покоящуюся систему координат нормальная компонента скорости

$$v'_z = v_a \sin \phi'$$

остаётся неизменной. Нейтрон перестанет быть ультрахолодным, если

$$v'_z = v_a \sin \phi' > v_a \sin \phi_0. \quad /6/$$

Это условие, как видно из /5/, будет выполнено, если λ/λ_a - величина не очень малая по сравнению с единицей. Этому условию поверхностные волны в самом деле удовлетворяют. Действительно, можно ожидать, что основной вклад в поверхностные волны будут вносить волны с частотой, близкой к максимальной, т.е. с $\omega \sim 10^{13}$. Им при скорости $v_a \sim 10^5$ см/сек соответствует $\lambda_a \sim 10^{-8}$ см.

Следовательно, такое отражение в самом деле будет приводить к нагреву нейтронов.

Таким образом, вопрос состоит только в том, может ли это рассеяние объяснить аномальное поглощение также и количественно. Амплитуда поверхностных волн мала. Можно думать, что толщина слоя вещества, ответственного за поверхностные волны, - порядка одного атомного слоя, т.е. $d \sim 10^{-8}$ см.

Плотность ультрахолодных нейтронов быстро спадает с глубиной. Как показано в /4,7/, плотность их на глубине z от поверхности равна

$$= \frac{2mz}{\hbar} \sqrt{v_0^2 - v_z^2}$$

$$\rho = \rho_0 e \quad /7/$$

Полагая $d \sim 10^{-8}$, получим, что поверхностный слой составляет от всего отражающего слоя величину порядка

$$a = \frac{2md}{\hbar} \sqrt{v_0^2 - v_z^2} \approx \frac{4\pi}{\lambda_0} d, \quad /8/$$

где λ_0 - длина волны нейтронов пороговой скорости

$$\lambda_0 = \frac{h}{m v_0} \sim 10^{-5} \text{ см.}$$

Отсюда $a \sim 10^{-2}$. Величине a , очевидно, пропорционально отношение амплитуды волны рассеянной поверхностным слоем к полной амплитуде. Доля нейтронов, рассеянных поверхностной волной, должна составить, следовательно, $a^2 \sim 10^{-4}$, что по порядку величины совпадает с наблюдаемым в аномальном поглощении. Можно величину a^2 оценить и иначе. Нетрудно, используя формулы, приведенные в /7/, подсчитать коэффициент отражения ультрахолодных нейтронов от очень тонкого изолированного слоя толщины $d \ll \lambda_0$. Он оказывается равным*

$$a^2 = k''^2 d^2 \frac{(n''^2 + 1)^2}{4n''^2} \quad /9/$$

Здесь k''^2 - квадрат мнимой части волнового числа для ультрахолодных нейтронов /4,6/

$$k''^2 = \frac{m^2 (v_0^2 - v_z^2)}{\hbar^2} \quad /10/$$

и n''^2 - квадрат мнимой части показателя преломления /см. /4,6/ /

$$n''^2 = \frac{v_0^2 - v_z^2}{v_z^2} \quad /11/$$

Отсюда

$$a^2 = \frac{\pi^2 d^2}{\lambda_0^2} - \left(\frac{v_0}{v_z} \right)^2 \quad /12/$$

Полагая $v_0/v_z = 2$, получим для a^2 величину в четыре раза меньшую, чем в оценке, приведенной выше, т.е. порядка 10^{-5} . Эти оценки приводят, следовательно, по

* Этот вопрос будет рассмотрен отдельно.

порядку величины либо к эффекту, ожидаемому для аномального поглощения, либо к величинам, на порядок меньшим. Поскольку, однако, эффективная толщина d определена с точностью до численного коэффициента и входит в результат квадратично, то такое расхождение нельзя считать имеющим решающее значение.

Из сказанного видно, что аномалия в хранении ультрахолодных нейтронов, по крайней мере, частично связана с поверхностными волнами, и что этот вопрос требует более детального теоретического рассмотрения.

Автор очень признателен В.К.Игнатовичу за ряд очень существенных замечаний и В.И.Луцикову за плодотворное обсуждение.

Литература

1. Ф.Л.Шапиро. Препринт ОИЯИ, РЗ-7135, Дубна, 1973. F.L.Shapiro. Nuclear Structure Study with Neutrons, Budapest 1974, p. 259.
2. В.И.Луциков. II Школа по нейтронной физике, Алушта, 1974, Дубна, ДЗ-7991, Дубна, 1974, стр. 7.
3. А.Steyerl. Школа по нейтронной физике, Алушта, 1974, ДЗ-7991, Дубна, 1974, стр. 42. A.Steyerl and H.Vonach. Z.Physik, 250, 166, 1972; A.Steyerl. Dissertation Technische Universität, München, 1971.
4. И.М.Франк. II Школа по нейтронной физике. Алушта, 1974, ДЗ-7991, Дубна, 1974, стр. 38.
5. В.К.Игнатович. Сообщение ОИЯИ Р4-7055, Дубна, 1973. А.В.Степанов, А.В.Шелагин. Краткие сообщения по физике, 1974.
6. Lord Rayleigh, Scientific Papers, 5, p. 398. Л.И.Мандельштам. Полное собрание трудов, т. 1, стр. 250, М., АН СССР, 1948.
7. И.М.Франк. Препринт ОИЯИ РЗ-7810, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 мая 1975 года.