

## КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ХРАНЕНИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ПЛОСКОСТИ

В.И. Луциков, А.И. Франк

Рассмотрена задача о хранении ультрахолодных нейтронов (УХН) на плоскости при наличии гравитационного поля. При этом энергия вертикального движения квантована, а волновые функции первых состояний локализованы в пространстве. Энергетическая и линейная постоянные задачи имеют значение:  $\epsilon = 0,6 \cdot 10^{-12}$  эВ и  $l = 0,3 \cdot 10^{-3}$  см. Предложен способ экспериментального выделения нейтронов, находящихся на первом энергетическом уровне. Обращается внимание на то обстоятельство, что применением неоднородного магнитного поля можно поменять величины  $\epsilon$  и  $l$  в довольно широком диапазоне.

Открытие ультрахолодных нейтронов (УХН) сделало доступной для изучения новую область очень низких энергий элементарных частиц. Теперь для работающих с УХН стали привычными энергии  $\sim 10^{-8}$  эВ. Можно ожидать, что в ближайшее время появятся источники УХН с существенно большей, чем сейчас, интенсивностью, что позволит работать с еще более "холодными" нейтронами. При переходе к еще более низким энергиям возможно проявление квантовых эффектов в макроскопических объектах. В этой связи можно, в частности, рассмотреть хорошо известную задачу о частице, упруго отражающейся, от горизонтальной плоскости и находящейся в потенциале  $U = Fz$  (рис. 1). При этом энергия вертикального движения квантована, а волновые функции уровней есть функции Эйри [1, 2]. Задача характеризуется энергетической постоянной  $\epsilon = [(\hbar F)^2/2m]^{1/3}$  и линейной постоянной  $l = (h^2/2mF)^{1/3}$ . Для нейтрона, хранящегося на плоскости в гравитационном поле ( $F = mg$ ), значения этих величин таковы:  $\epsilon = 0,6 \cdot 10^{-12}$  эВ,  $l = 0,3 \cdot 10^{-3}$  см. Положение уровней определяется соотношением  $E_n = -\lambda_n \epsilon$ , где  $\lambda_n$  — нули функции Эйри.

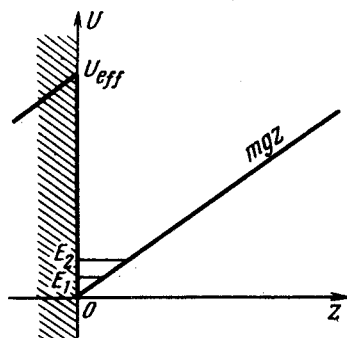


Рис. 1. Эффективный потенциал при отражении УХН от горизонтальной плоскости  $E_1 = 1,4 \cdot 10^{-12}$  эВ,  $E_2 = 2,45 \cdot 10^{-12}$  эВ.

Первые два уровня имеют энергию  $1,4 \cdot 10^{-12}$  и  $2,45 \cdot 10^{-12}$  эВ. Очень близкий результат можно получить, комбинируя классическое выражение  $H = v^2/2g$  ( $H$  — высота подъема нейтрона над поверхностью) с квантовомеханическим требованием  $H \gtrsim \lambda$ ,  $v^2/2g \gtrsim 2h/mv$ , откуда  $v \gtrsim 2,4$  см/се

$H \sim 0,003$  см,  $E = mv^2/2 \approx 3 \cdot 10^{-12}$  эВ. В работе [3] также обращалось внимание на то обстоятельство, что волновая функция первого уровня локализована вблизи плоскости в области, имеющей заметно меньшие размеры, чем для второго уровня (19 и 28 мкм соответственно). Это позволяет в принципе экспериментально выделить нейтроны, находящиеся только на первом уровне.

Если пучок УХН пропускать через щель высотой  $\sim 20$  мкм, образованную горизонтальной отражающей плоскостью и поглотителем с нулевой граничной скоростью (рис. 2), то нейтроны с энергией  $E_2$  будут поглощены, а нейтроны с энергией  $E_1$ , будут такой системой пропущены. Эти нейтроны будут течь (или "катиться") по поверхности, не отрываясь от нее (на тангенциальную составляющую скорости ограничений не наложено), даже если поверхность отклоняется от горизонтальной, поскольку переход на следующий уровень требует конечного приращения энергии. Поток таких нейтронов составляет примерно  $10^{-3}$  от общего потока и не безнадежно мал для эксперимента.

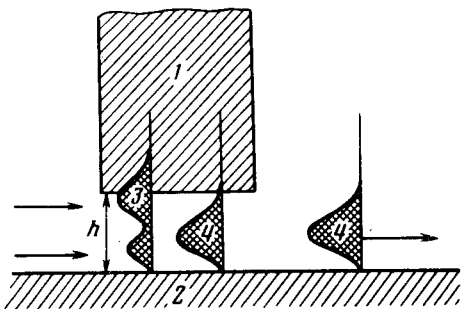


Рис. 2. "Течение" УХН по горизонтальной плоскости в случае гравитационного потенциала. 1. Поглотитель. 2. Отражающая поверхность. 3. Плотность УХН с энергией вертикального движения  $E_2 = 2,45 \cdot 10^{-12}$  эВ. 4. Плотность УХН с энергией вертикального движения  $E_1 = 1,4 \cdot 10^{-12}$ . Высота щели  $h \approx 20$  мкм

На величины эффектов можно влиять, поместив систему в неоднородное магнитное поле ( $F = mg \pm \mu(\partial B/\partial z)$ ), где  $\mu$  — магнитный момент нейтрона.

Выбирая нужную величину магнитного поля и направление поляризации нейтронов, можно менять величину  $F$  в широких пределах. Компенсируя гравитацию ( $F < mg$ ), можно увеличить  $l$  ( $l \sim 1/F^{1/2}$ ), сделав более выраженным описанный выше эффект поверхностного течения УХН. С другой стороны, увеличив  $F$  применением сильно неоднородного поля, можно заметно увеличить величину  $\epsilon$ . Для величины неоднородности поля  $\partial B/\partial z = 5 \cdot 10^4$  гс/см, что является вполне достижимым, получим

$$F = \mu \frac{\partial B}{\partial z} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ эВ/см} \quad (mg \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ эВ/см}). \quad \text{При этом } \epsilon =$$

$= 1,2 \cdot 10^{-10}$  эВ, а первые два уровня лежат при значении  $2,8 \cdot 10^{-10}$  и  $4,9 \cdot 10^{-10}$  эВ, т. е. в области, уже доступной для спектрометрии. Заслуживает внимания вопрос о времени жизни нейтрона в такой системе. В классическом случае при  $v < v_{\text{Гр}}$  время жизни нейтрона на плоскости в поле тяготения определяется соотношением [4]  $\tau = v_{\text{Гр}}/g\eta$ , где  $\eta$  — отношение мнимой и действительной частей потенциала стенки. Для обычных значений  $v_{\text{Гр}}$  и  $\eta$   $v_{\text{Гр}} = 500$  см/сек и  $\eta = 1 \cdot 10^{-4}$  получим  $\tau = 5 \cdot 10^3$  сек, что больше периода полураспада нейтрона  $\tau_0 \approx 10^3$  сек. Наш случай эквивалентен замене  $g$  на величину  $F/m$ . Таким образом, классическая оценка приводит к значению для времени жизни нейтрона

в такой системе  $\tau \sim 20$  сек и для ширины уровней —  $3 \cdot 10^{-17}$  эВ. При движении нейтрона по плоскости возможно неупругое рассеяние на шероховатостях поверхности. При этом нейтрон, имеющий горизонтальную компоненту скорости, воспринимает шероховатости как колеблющуюся поверхность. Оценки показывают, что вероятность такого рассеяния  $\sim 10^{-3}$  сек $^{-1}$ .

Хотелось бы отметить, что в эксперименте с магнитным потенциалом можно менять величину магнитной индукции во время хранения нейтронов, изучая таким образом нестационарную картину.

Авторы благодарны И.М.Франку за весьма полезные обсуждения затронутых вопросов.

Объединенный институт  
ядерных исследований

Поступила в редакцию  
12 сентября 1978 г.

### Литература

- [1] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика. М., изд. физ.-мат. литературы, 1963, § 24.
  - [2] З. Флюгге. Задачи по квантовой механике, М., изд. Мир, 1974 г., задача 40.
  - [3] В.И.Лушиков. Доклад на Междунар. конф. по взаимодействию нейтронов с ядрами, ЛОУЭЛЛ, США, 6 — 9 июля 1976.
  - [4] В.К.Игнатович, Г.И.Терехов. Сообщение ОИЯИ, Р4-9567, 1976 г.
-