

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ХРАНЕНИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ НАД МАГНИТНЫМ ЗЕРКАЛОМ

*В. А. Васильева**, М. А. Захаров

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: vava.21@uni-dubna.ru

Гравитационное взаимодействие - единственное из четырех известных типов взаимодействия, которое не имеет строгого квантового описания в рамках Стандартной модели. Экспериментальное изучение влияния гравитации в квантовых системах чрезвычайно затруднено слабостью гравитационного взаимодействия по сравнению с другими силами. Ультрахолодные нейтроны (УХН) являются одной из наиболее удобных частиц для исследования гравитации в квантовой области, поскольку не обладают электрическим зарядом, а их квантово-оптические свойства проявляются достаточно ярко из-за большой длины волны.

При хранении нейтронов на зеркале в гравитационном поле их вертикальное движение квантуется, а энергетический спектр состояния принимает дискретный вид. Впервые о явлении квантования энергии нейтронов в гравитационном поле говорится в работе Франка и Лушкова [1]. Квантовые состояния нейтрона с дискретным энергетическим спектром в гравитационном поле вблизи поверхности называют гравитационными уровнями. Существование гравитационных уровней для нейтрона было продемонстрировано в экспериментах Несвижевского [2]. Дальнейшее развитие направления исследования гравитационных уровней нейтронов получило в работах научной группы Хартмута Абея [3, 4], в котором изучались переходы между гравитационными уровнями, вызванными периодическим нестационарным внешним воздействием на квантовую систему. В указанных выше работах нейтроны хранились на материальном зеркале, однако существует идея альтернативного подхода, в котором вместо материального зеркала предлагается использовать магнитное зеркало Владимирского [5, 6], когда нейтрон «левитирует» в магнитном поле (рис. 1). Хранение нейтронов над магнитным зеркалом возможно благодаря наличию у нейтрона магнитного момента. Преимуществом данного подхода является возможность управлять параметрами квантовой системы путём изменения параметром магнитного поля зеркала.

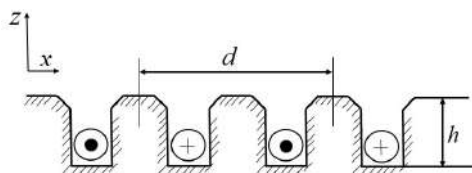


Рис. 1. Плоское магнитное зеркало. Периодическая структура из проводников с током [6].

Доклад посвящен результатам работы по развитию направления исследования нестационарных квантовых эффектов при хранении УХН в гравитационном поле над магнитным зеркалом. Была решена квантовая задача о переходах нейтронов между гравитационными уровнями в системе гравитационного и магнитного полей в присутствии внешнего нестационарного периодического воздействия.

Движение нейтронов в системе из гравитационного поля и магнитного поля, создаваемого зеркалом Владимирского, описывается нестационарным уравнением Шрёдингера:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(z, t)}{\partial t} = (H_0 + H')\psi(z, t). \quad (1)$$

Стационарная часть гамильтониана H_0 имеет вид:

$$H_0 = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + mgz + \mu B \exp\left(-\frac{2\pi}{d}z\right), \quad (2)$$

здесь m – масса нейтрона, μ – магнитный момент нейтрона.

Нестационарная часть гамильтониана H' описывает внешнее воздействие на квантовую систему, вызывающую переходы нейтронов между уровнями. В качестве внешнего воздействия было рассмотрено такое изменение параметров магнитного поля, что периодически изменяет положение потенциальной ямы в пространстве.

Уравнение (1) решалось в рамках теории нестационарных возмущений, в которой волновая функция нейтронов представлялась в виде суммы состояний гравитационных уровней стационарной системы (2) с зависящими от времени амплитудами.

$$\psi(z, t) = \sum_n a_n(t) \psi_n(z) = \sum_n a_n \psi_n(z) \exp(-i\omega_n t). \quad (3)$$

Здесь частоты ω_n соответствуют энергиям n -го уровня.

Волновые функции ψ_n стационарных состояний для гамильтониана (2) достаточно сложно вычислить аналитически, однако возможно так подобрать параметры магнитного зеркала, чтобы для первых нескольких уровней стало применимо приближение гармонического осциллятора. В качестве начального состояния была взята нейтронная волна нулевого гравитационного уровня.

В результате расчетов была получена эволюция волновой функции с течением времени (рис. 2а). Была оценена интенсивность волны первых гравитационных уровней в конечный момент времени внешнего воздействия в зависимости от частоты возмущения (рис. 2б). Провал в интенсивности соответствует резонансной частоте переходов между энергетическими уровнями.

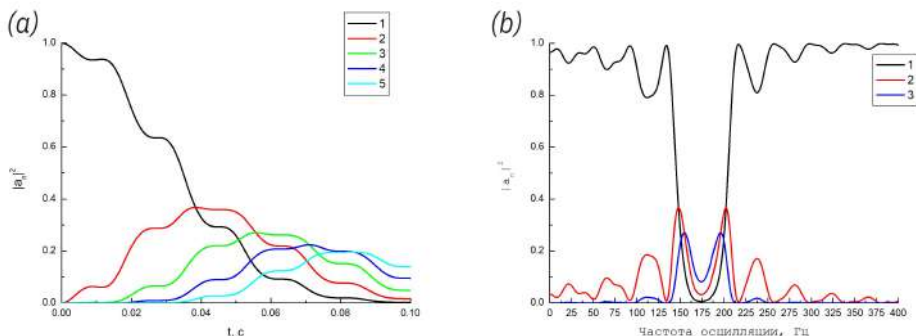


Рис. 2. (а) – Зависимость интенсивности состояний гравитационных уровней от времени для резонансной частоты возмущений. (б) – Зависимость интенсивности состояний гравитационных уровней в конечный момент времени от частоты возмущений.

1. V. Luschikov, A. Frank, Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **28**, 607 (1978).
2. V. Nesvizhevsky et al., Nature **415**, 297 (2002).
3. G. Cronenberg et al., Nature Physics **14**, 1022 (2018).
4. M. Suda et al., Z. Naturforsch **77**, 875 (2022).
5. A. I. Frank, V. G. Nosov, JETP Letters **79**, 313 (2004).
6. В. В. Владимирский, ЖЭТФ **39**, 1062 (1960).