

ДИНАМИКА КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ
В ОПТОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ НАЛИЧИИ
НЕПРЕРЫВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

О.М. Кирюхин

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия
kiryukhin@physics.msu.ru*

Множество научных групп по всему миру пытаются подтвердить универсальный характер квантовой механики, экспериментально проверить ее применимость для описания макроскопических механических объектов. Если успех будет достигнут, то это будет иметь значение не только для понимания фундаментальной физической картины мира, но также откроет новые технологические горизонты для разработки квантового компьютера, квантовых коммуникаций, квантовой криптографии и квантовых вычислений.

Оптомеханические системы, в которых свет взаимодействует с механическими объектами посредством радиационного давления, стали идеальным средством для изучения макроскопических механических объектов в квантовом состоянии [1].

В действительности проводить подобные эксперименты очень сложно, поскольку неклассические квантовые состояния очень чувствительны к внешним воздействиям и, вследствие взаимодействия с окружением, распадаются на классическую некогерентную суперпозицию. Поэтому крайне необходимо найти системы, которые максимально изолированы от внешних воздействий, или, другими словами, имеют минимальный уровень классических шумов, приводящих к декогеренции.

Одной из наиболее интересных экспериментальных задач современной физики является проверка парадокса Эйнштейна-Подольского-Розена в его исходной трактовке, то есть для координат и импульсов макроскопических механических объектов [1,2]. Следует отметить, что достижения последних лет в области прецизионных механических измерений, стимулированные, в частности, разработкой лазерных детекторов гравитационных волн [3], позволяют рассчитывать на практическую реализацию таких экспериментов.

Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена приводит к понятию квантовой запутанности. Мы моделируем экспериментальную схему, в которой возможно приготовить два макроскопических механических объекта в запутанном состоянии при наличии непрерывных измерений. При этом исследуется динамическое поведение системы.

Мы рассматриваем систему, состоящую из двух связанных механических осцилляторов. Координаты осцилляторов линейно связаны с оптическими полями посредством светового давления. Предполагается,

что в схеме производятся непрерывные измерения квадратур отраженного света, несущих информацию о механических координатах. Система линейна, а все шумы гауссовские, поэтому её состояние полностью характеризуется условной ковариационной матрицей. Она может быть восстановлена путем непрерывных измерений. Чтобы получить условное квантовое состояние мы должны извлечь о нём максимум информации из наших измерений. Для этого необходимо решить стохастическое уравнение Линблада. Для гауссовских систем можно показать, что это эквивалентно применению фильтра Калмана-Белавкина [4]. Эта процедура минимизирует дисперсию и позволяет получить максимум информации, то есть восстановить условное квантовое состояние.

Рассматриваемая система с некоторыми приближениями эквивалентна схеме, состоящей из интерферометра Майкельсона с двумя резонаторами Фабри-Пери в конфигурации, известной как «localreadout» [5]. Система накачивается двумя лазерами на разных частотах. Используется приближение плохого резонатора, в котором спектральная ширина моды резонатора предполагается намного больше механической частоты. В резонаторы вносятся отстройка, что создает оптическую жесткость между входными и боковыми зеркалами резонаторов [6]. Одна накачка измеряет информацию о разностной моде входных зеркал, другая — информацию о разностной моде концевых зеркал. Эти моды могут быть рассмотрены как осцилляторы.

В качестве параметров системы мы используем предполагаемые параметры для детектора гравитационных волн Advanced LIGO [3]. В качестве меры квантовой запутанности мы используем логарифмическую отрицательность [7]. Нами проанализирована зависимость логарифмической отрицательности от различных параметров системы. Логарифмическая отрицательность уменьшается при увеличении частоты силового шума, уменьшается при уменьшении координатного шума и уменьшается при уменьшении квантовой эффективности. Введение сжатого вакуума в темный порт может увеличить запутанность в системе.

Мы показываем, что квантовая запутанность является результатом динамики системы. Было получено, что квантовая запутанность осциллирует со временем и достигает стационарного значения (см. Рис. 1). Основным критерием существования стационарной запутанности является требование того, чтобы классический шум был ниже стандартного квантового предела (СКП). Таким образом, СКП является критерием для экспериментов по проверке парадокса ЭПР. Немаловажным результатом также явилось и то, что впервые в механической системе с непрерывным спектром при наличии измерений наблюдаются явления, известные как «внезапное исчезновение запутанности» [8] и «внезапное возрождение запутанности» [9] (см. Рис. 2).

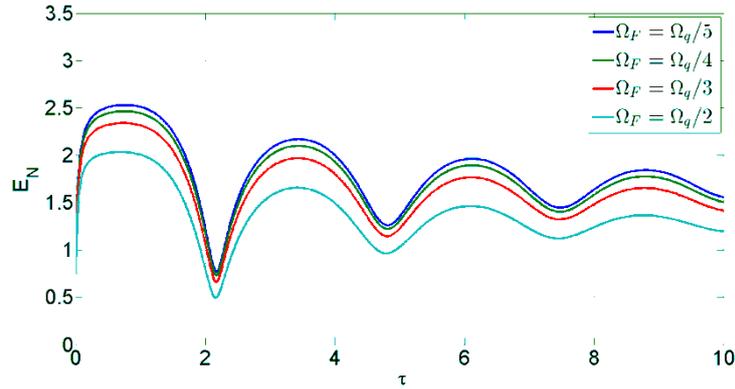


Рис. 1. График зависимости логарифмической отрицательности E_N от времени $\tau = \Omega_S t$ при различных параметрах частоты силового шума Ω_F , механическая добротность $Q_m = 10^8$, частота квантового шума $\Omega_q / 2\pi = 100$ Гц, частота координатного шума $\Omega_X = 3\Omega_q$, квантовая эффективность $\eta = 0.9$, гомодинный угол $\zeta = \pi/4$, коэффициент сжатия $q = 0$.

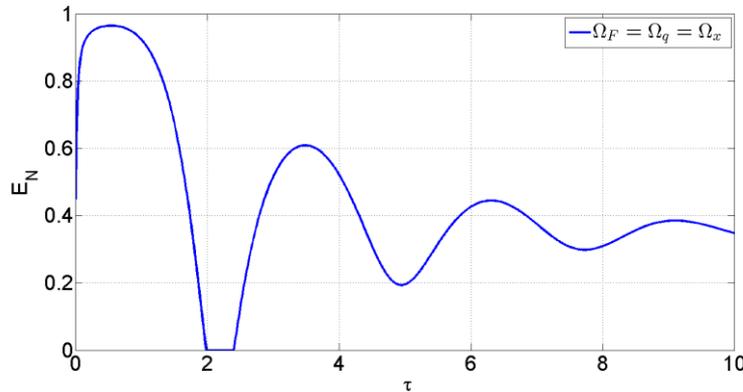


Рис. 2. График зависимости логарифмической отрицательности E_N от времени $\tau = \Omega_S t$ при $\Omega_F = \Omega_q = \Omega_X$, механическая добротность $Q_m = 10^8$, частота квантового шума $\Omega_q / 2\pi = 100$ Гц, частота координатного шума $\Omega_X = 3\Omega_q$, квантовая эффективность $\eta = 0.9$, гомодинный угол $\zeta = \pi/4$, коэффициент сжатия $q = 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирюхин О.М., Данилишин Ш.Л. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2012, № 1, с. 120110.
2. Einstein A., Podolsky B., and Rosen N. // Phys. Rev. 1935, V. 47, pp. 777–780.
3. www.advancedligo.mit.edu (Advanced LIGO project webpage).
4. Belavkin V.P. // Comm. Math. Phys. 1992, V. 146, pp. 611–635.
5. Rehbein H. et al. // Phys. Rev. D. 2007, V. 76, p. 062002.
6. Danilishin S.L., Khalili F.Ya. // Living Rev. Relativity. 2012, V. 15, n 5.
7. Vidal G., Werner R. F. // Phys. Rev. A 2002, V. 65, p. 032314.
8. Ficek Z., Tanas R. // Phys. Rev. A. 2006, V. 74, p. 024304.
9. Yu Ting, Eberly J. H. // Phys. Rev. Lett. 2004, V. 93, p. 140404.