

**ОТЗЫВ**  
на автореферат диссертации  
**Олега Владимировича Астафьева**

«КВАНТОВАЯ ОПТИКА  
НА ИСКУССТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ»

представленной на соискание степени доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

Диссертация О.В.Астафьева посвящена физике квантово-когерентных явлений в системах на основе твердотельных материалов, в основном сверхпроводниковых кубитов. В ней представлен очень широкий набор результатов в области, получившей название квантовой оптики таких систем. Диссертация представляет огромный пласт работ в области квантовой физики сверхпроводниковых и твердотельных систем. По многим направлениям вошедшие в диссертацию работы являются пионерскими и их результаты открыли новые области исследований, которыми занимаются тысячи исследователей по всему миру. Физика квантово-когерентных явлений, со одной стороны, связана с фундаментальными вопросам квантовой механики, а с другой, с имеющимися и потенциальными приложениями, относящимися к квантовым технологиям.

Охват и значение диссертационной работы виден уже по списку работ, вошедших в диссертацию, который включает больше восьми десятков статей в ведущих мировых журналах, в том числе больше двух десятков статей в таких журналах как Nature, Science, Physical Review Letters. Он охватывает несколько различных направлений, связанных общей темой диссертации. Первая глава диссертации посвящена транспортным свойствам через квантовые точки в двумерном электронном газе. Дальнейшие работы связаны с квантово-когерентными явлениями в джозефсоновских системах. Во второй главе представлены результаты пионерских работ сразу по нескольким направлениям, заложившие основы в области исследования физических явлений в сверхпроводниковых кубитах и их приложений. В последующих главах описаны результаты квантово-оптических экспериментов с джозефсоновскими кубитами и микроволновыми резонаторами, исследования взаимодействия джозефсоновских кубитов с акустическими волнами, работы по пионерским наблюдениям явлений, связанных с квантовым проскальзыванием фазы в нанопроволоках.

Мне хотелось бы остановиться на значении нескольких пионерских работ, касающихся сверхпроводниковых квантовых битов. Результаты, описанные в Главе 2, заложили основы для развития экспериментальной реализации джозефсоновских кубитов и операций с ними. Реализация кубитов как элементов квантового компьютера требует, помимо создания самих управляемых двухуровневых систем, возможности проведения элементарных квантовых операций с отдельными кубитами и парами кубитов, а также проведения высокоточных квантовых измерений. Дополнительным требованием является высокая степень квантовой когерентности кубитов. Пионерские эксперименты, продемонстрировавшие эти возможности в зарядовых джозефсоновских кубитах, описаны в диссертации. Во-первых, это первая в мире демонстрация управляемой квантово-когерентной динамики пары зарядовых кубитов (в режиме кулоновской блокады и одно-электронных явлений) и реализации их квантово-запутанного состояния. Кроме того, реализована впервые в мире демонстрация нетривиальной двухкубитной квантовой операции, операции CNOT, создающей

максимальную запутанность и дающей универсальный набор квантовых логических операций, достаточный для реализации полномасштабных квантовых вычислений.

Более того, в этой же главе описано первое в мире проведение квантового измерения состояния джозефсоновского кубита с точностью, близкой к стопроцентной. Такие измерения реализуют процесс, близкий к идеальному фон-неймановскому измерению, известному из учебников квантовой механики, где оно описывается как некий абстрактный процесс. Важно подчеркнуть, что хотя в принципе точность измерения можно повышать набором статистики при повторении эксперимента, и можно было бы надеяться обойтись измерением меньшей точности для считывания средних значений квантовых величин, для квантовых вычислений и других приложений в квантовой информатике, а также для исследований фундаментальных вопросов квантовой механики требуется именно однократное / «единоразовое» измерение («с одной попытки», single-shot), дающее фон-неймановскую статистику. Такой квантовый детектор и был впервые продемонстрирован в работе, описанной в следующем разделе главы 2. Моделирование создаёт полную картину и позволяет разобраться в способах количественной характеристики квантового детектора и процесса квантового измерения.

Наконец, следующий раздел той же второй главы содержит описание ещё одного существенного результата. Он касается вопроса о поддержании квантовой когерентности: любая квантовая система из-за взаимодействия с окружением (резервуаром) теряет когерентность, т. е. нарастает её квантовая запутанность с резервуаром, в результате чего её поведение со временем превращается в классическое. В частности, это явление накладывает ограничения на работу квантового компьютера, и с этой точки зрения требуется ослабление процессов разрушения когерентности до приемлемого уровня (позволяющего, например, применять методы квантовой коррекции ошибок). С физической же точки зрения представляет значительный интерес изучение природы и свойств шума, подавляющего когерентность. В диссертации описаны эксперименты, сделавшие существенный шаг в понимании природы такого шума, ограничивающего когерентность сверхпроводниковых квантовых систем, и демонстрирующие значительные возможности джозефсоновских квантовых систем как спектрометров квантового шума. Элегантным образом было показано, что высокочастотный шум, определяющий энергетическую релаксацию кубитов, и низкочастотный  $1/f$  шум, вызывающий процессы сбоя фазы, в действительности могут определяться одними и теми же микроскопическими источниками. Эти результаты послужили основой для значительного продвижения в понимании физики низкочастотного шума в джозефсоновских устройствах и возможностей его подавления.

Глава 3 диссертации описывает новую и быстроразвивающуюся область, квантовую оптику сверхпроводниковых систем, также известную как квантовая электродинамика сверхпроводниковых схем. В системах, построенных на основе квантовых битов («искусственных атомов») и микроволновых резонаторов удалось продемонстрировать аналоги явлений, известных в обычной квантовой оптике. Однако, было также показано, что благодаря особенностям квантовых сверхпроводниковых систем удаётся наблюдать явления, которые очень труднодоступны в обычной атомной квантовой оптике. Важной отличительной особенностью является возможность достижения режима сильной и сверхсильной (ultrastrong) связи двухуровневой системы с резонатором, аналога связи атома с полем.

По представлению материала в тексте автореферата есть следующие незначительные замечания. При описании в Главе 2 пионерского эксперимента по квантовому измерению состояния зарядового кубита полезно было бы привести данные по точности, достигнутой в данной работе, но также и данные о достигнутых ранее значениях точности. Это

продемонстрировало бы, насколько значительны были достижения в данной работе, как и сам факт первого высокоточного («однократного») измерения.

Также хочется отметить, что на мой взгляд традициям русскоязычной литературы больше соответствует название «сверхпроводниковая ловушка», а не «куперовский бокс».

В целом диссертация представляет собой сборник материалов, который мог бы служить отличным введением в предмет или учебником, он резюмирует многие основные достижения по тематике диссертации. Одновременно это показывает, что настоящая диссертация действительно описывает результаты автора, широко известные специалистам и послужившие основой для создания, можно сказать, нескольких новых направлений развития науки. Работа представляет собой докторскую диссертацию высочайшего уровня.

На основании ознакомления с авторефератом можно заключить, что представленная диссертация «Квантовая оптика на искусственных квантовых системах» описывает крупное научное достижение и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор О.В.Астафьев безусловно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

2 марта 2024 г.

Ю.Г. Махлин

д.ф.-м.н. (01.04.02, теоретическая физика), член-корр. РАН  
заведующий лабораторией, международная лаборатория физики конденсированного  
состояния НИУ ВШЭ, 101000, г. Москва, ул.Мясницкая, д.20.

тел: (495) 772-95-90

e-mail: makhlin@itp.ac.ru

**Подпись заверяю**

ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО  
КАДРОВОМУ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВУ  
ЦЕНТРА ПО КАДРОВОМУ АДМИНИСТРИРОВАНИЮ  
УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛА  
КУНЕВА О.А.

05.03.2024

