

ГОЛОС НАУКИ: РОЖДЕННЫЕ СВЕТОМ: НОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

31 июля 2024

В стенах нашего университета идут фундаментальные научные исследования, касающиеся еще неизвестных свойств света и материи на квантовом уровне. Об одном из направлений таких исследований мы беседуем с доцентом кафедры теоретической ядерной физики НИЯУ МИФИ, кандидатом физико-математических наук Ниной Вороновой.



Нина Воронова

Нина Сергеевна, в начале – традиционный вопрос: над чем вы сейчас работаете?

Глобально область, в которой я работаю, называется «теоретическая физика связи света с веществом». Более узко – это физика электронных возбуждений в полупроводниках. Когда полупроводник освещается светом, чаще всего это лазер, в нем могут возникать такие возбуждения, называемые экситонами.

Поясните сразу – чтобы не брать формулировку из википедии - что это такое?

Экситон – это возбуждение в полупроводнике, возникающее в случае облучения лазерной накачкой, когда электроны выбиваются из валентной зоны в зону проводимости. Если электрон перешел в зону проводимости, в валентной зоне осталась так называемая «дырка», эффективно-положительный заряд, и дырка с

электроном притягиваются друг к другу по закону Кулона и могут образовать связанные состояния, которые ведут себя подобно атому водорода. Конечно, у атома водорода другая масса, другой размер, но с точки зрения квантовой механики – такая же физика. Эта электронно-дырочная пара в полупроводнике и называется экситон. Экситоны могут довольно долго существовать. Долго на нашем языке – это времена порядка микросекунд.

А если мы этот полупроводник еще поместим в резонатор, то есть между двумя зеркалами... Что будет, если мы два зеркала поставим? Мы свету запретим выходить. При исчезновении экситона свет высветился из кристалла, но он отражается от зеркала, а не улетает в небо. И может снова возбудить экситон. Тогда фотоны (частицы света) и экситоны могут постоянно друг в друга превращаться. В этом случае – в ситуации их резонансного взаимопревращения – с точки зрения квантовой механики возникает новая частица, точнее квазичастица, которая называется поляритоном: наполовину свет, наполовину экситон. Возникновение экситонов и поляритонов приводит к интересной физике, которая может проявляться при низких температурах, а может и при высоких, в зависимости от материалов, с которыми мы работаем.

И что именно вы исследуете?

Сейчас у моей научной группы две основных линии исследования. Первая – это поляритонные бозе-конденсаты в кольцевых структурах. Эта тема выросла из нашего предыдущего сотрудничества с итальянскими экспериментаторами. Последние три года у нас был совместный проект с итальянским научно-исследовательским сообществом (CNR). Мы много к ним ездили, они к нам ездили, и сделали несколько совместных работ, посвященных экситон-поляритонным конденсатам, после чего заинтересовались именно кольцевыми структурами.

Почему?

Потому что они позволяют за счет кольцевой геометрии реализовывать эффекты, которых не бывает в обычных плоских системах. И если такую систему описать математически, то уравнения будут очень похожи на уравнения, описывающие сверхпроводники. Поскольку мы знаем, что на сверхпроводниковых кольцах делают, в том числе, кубиты для квантовых вычислений, то есть теоретическая надежда, что при помощи поляритонных колец можно будет тоже сделать что-то подобное и пронаблюдать эффекты, сходные со сверхпроводниковыми.

Вот в этом направлении мы работаем совместно с итальянскими коллегами, они ставят эксперименты, мы пишем теорию. Сейчас мы сделали совместную работу,

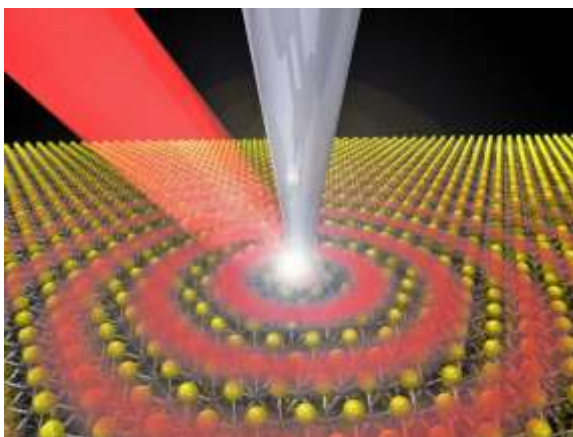
которая называется «Экситон-поляритонный кольцевой джозефсоновский контакт». Эффект Джозефсона – это очень известная вещь, которая была удостоена Нобелевской премии, и это первый шаг к возможности реализации каких-то систем типа кубитов.

А в чем суть этих особых эффектов, которые именно в кольцевых системах есть, а в других нету?

Если мы возьмем и создадим на таком кольце какой-то барьерчик, дефект, продавим плотность поляритонов... Ну, если продавить очень сильно, то ничего не будет, просто разорвем кольцо и все. А если продавить не очень сильно, но достаточно сильно, то могут возникать квантовые туннельные эффекты. На туннелировании через барьер и основан эффект Джозефсона. Изначально он был предложен для сверхпроводников в шестидесятых годах. А вот в таких бозонных кольцевых системах он обнаружен нами впервые.

Какое же второе направление ваших исследований?

Это тоже экситоны и поляритоны, но в двумерных кристаллах. Предметом исследования являются дихалькогениды переходных металлов, то есть такие вещества как дисульфид молибдена, диселенид вольфрама и так далее. Эти специфические химические соединения хороши тем, что их можно отслоить от кристалла и сделать тонкий слой, буквально в один атом. И тогда в этом слое возникает как бы двумерная геометрия. И это приводит к более сильным взаимодействиям частиц, например, заряды взаимодействуют не по закону Кулона – просто из-за того, что заряды находятся в двумерном слое. Такие системы хороши тем, в них экситоны и поляритоны могут жить при комнатных температурах, в отличие от материалов другого химического состава, где для реализации этого всего систему нужно очень сильно охлаждать.



То есть кольцевые структуры, о которых вы говорили, надо охлаждать?

Кольцевые структуры в экспериментах, о которых я рассказывала, охлаждались до 4 кельвинов, т.е. до гелиевой температуры, а вот в двумерных материалах можно наблюдать такие эффекты при комнатных температурах. Впоследствии, наверное, тоже можно придумать какие-то кольцевые геометрии. Сейчас по таким двумерным структурам имеется очень много противоречивых экспериментальных данных. В одном эксперименте померили – константа взаимодействия такая, в другом померили – в 10 раз больше, в третьем померили – в 100 раз меньше. И согласования с теорией хорошего нет. Вот сейчас мы написали теоретическую статью как раз про нелинейные эффекты в таких материалах, работа находится на рецензии.

Скажите, почему МИФИ, исторически связанный с ядерной физикой, вышел на эту тему? Какова предыстория этих исследований?

Наш ВУЗ исторически ядерный, и кафедра, на которой я работаю, – кафедра теоретической ядерной физики, но это название – дань истории. На самом деле, на нашей кафедре несколько разных групп, которые занимаются теорией в совершенно разных областях. Кто-то занимается сверхсильными полями, кто-то занимается физикой конденсированного состояния, как и я. У нас уже очень давно на кафедре много разных тематик, и когда меня во время учебы, как и всех студентов, сначала распределили на учебную научную работу, я просто стала заниматься этой темой.

А насколько эта тема сейчас актуальна в мировой и в российской науке? Много ли научных групп работают в этом направлении?

В России есть несколько научных групп мирового уровня – в Санкт-Петербурге, Новосибирске, в Москве... Если теоретиков брать, то много, а экспериментальные группы, которые занимаются экситонами и поляритонами, есть в Черноголовке, в Петербурге и в Москве (в Сколтехе). И в мире много ведущих центров – в Соединенных Штатах, в Европе, в Японии, в Китае.

А почему эта тема вызывает интерес учёных?

Дело в том, что в физике конденсированного состояния вы можете очень интересные, сложные явления, которые были описаны в книжке Ландау-Лифшица по теорфизике, пронаблюдать буквально «на столе». Вы берете эту структуру, начинаете светить в нее лазером, она излучает свет, вы считываете информацию

и получаете возможность исследовать очень много интересных фундаментальных эффектов. Вам не надо для получения информации о системе запускать спутник или делать что-то сверхсложное. Например, с экситон-поляритонными системами сходны системы холодных атомов. Но чтобы в системах холодных атомов наблюдать эффекты, про которые я говорю, их нужно охлаждать до сверхнизких температур, порядка милликельвинов. А в поляритонных структурах эту физику можно наблюдать при 4 кельвинах, это 100 раз больше. В случае двумерных структур – можно и при комнатной температуре, и сложность создания таких систем и наблюдения за ними просто несопоставима. Вы получаете эффективную экспериментальную площадку в своей не очень большой лаборатории.

Вы говорите, что с одной стороны, эффекты, которые можно наблюдать при лазерном возбуждении полупроводников, уже описаны в учебнике Ландау-Лифшица, но в то же время эти эффекты дают почву для приращения физической теории...

В учебнике Ландау-Лифшица описаны явления, которые скорее можно отнести к холодным атомам или, например, к жидкому гелию. А наши квазичастицы, экситоны и поляритоны, кроме того, что они могут воспроизводить фундаментальные явления из учебника, обладают своими особенностями. У них есть спиновая структура, у них конечное время жизни, и это привносит в их физику какую-то экзотику. Есть эффекты, которые можно пронаблюдать в поляритонах и нельзя пронаблюдать в других системах. Всякий раз, когда начинается изучение новой системы, сначала ученые пытаются в этой системе повторить то, что сделано в других. Изучая поляритоны, пытались повторить то, что сделано для холодных атомов, для жидкого гелия, применить к новому объекту старые уравнения. Но потом что-то не получается, и люди начинают думать: «О, а может быть мы сделаем что-то другое? Не просто скажем, что взяли и все воспроизвели при другой температуре, а сделаем еще что-то новое?». Здесь есть большое пространство для игры, потому что сходные эффекты можно реализовывать в совершенно разных материалах. Например, можно реализовывать их в двоякопреломляющих средах, где скорость распространения света в среде в разных направлениях разная. И если мы наши квазичастицы, которые наполовину свет, наполовину вещество, будем реализовывать в двоякопреломляющих средах, они будут по-разному как-то себя вести, не так, как атомы в ловушке. Есть вообще структуры, в которых можно реализовывать частицы с эффективной отрицательной массой, что значит: толкнули направо, а она поехала налево. В новых системах есть экзотика, которой нет в других местах.

Возможное приложение результатов таких исследований связано с квантовыми вычислениями?

Не только. Просто квантовые вычисления сейчас в моде. Все хотят насоздавать побольше кубитов. А 5-7 лет назад в моде были топология, топологические изоляторы, топологические эффекты. И поляритоны в полупроводниках рассматривались как новая платформа, на которой можно создать топологический изолятор. Кстати, поляритонный топологический изолятор был продемонстрирован в 2018 году, была статья в Nature. Еще раньше был сделан поляритонный лазер, он даже запатентован петербургскими учеными – терагерцовый лазер на экситонных поляритонах. Я не знаю, насколько это изобретение полезно для народного хозяйства, потому что для возбуждения такой системы нужен другой лазер. То есть, вы получите лазер, для работы которого нужен другой лазер, но тем не менее, это новое устройство. Ну а сейчас тренд сдвигается, как я уже сказала, в область квантовых информационных технологий. В любом случае, фундаментальную науку движет интерес к познанию, а познание мира – это не всегда про прикладное использование.

Беседовал Константин Фрумкин, пресс-служба НИЯУ МИФИ

Источник: официальный сайт НИЯУ МИФИ 31 июля 2024 года

<https://mephi.ru/press/news/23148>