На границе микромира

11.12.2025

Ровно сто лет назад у электрона было открыто новое физическое свойство – спин. Как из этого открытия родилось перспективное научное направление – спинтроника и чем она может быть полезна, рассказывает доктор физико-математических наук Юрий Кусраев, руководитель отделения физики твёрдого тела Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе.



Юрий Георгиевич Кусраев, доктор физико-математических наук, руководитель отделения физики твёрдого тела Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе. Фото Н. Лесковой.

— Юрий Георгиевич, как открыли спин и что это такое?

— Само открытие спина произошло в 1925 году. Но этому предшествовало множество открытий и фактов, которые свидетельствовали о том, что в понимании физики что-то не так, что-то не учитывается. Эксперименты показывают некие эффекты, а физики не знают, чем они вызваны. Нильс Бор, Вольфганг Паули и другие внесли большой вклад в понимание этих явлений. Но физики пока досконально не убедятся, пока всё не проверят, не высказывают свои мысли. И тут два молодых голландских физика Джордж Уленбек и Сэмюэль Гаудсмит смело высказали идею, что электрон, помимо заряда и орбитального углового момента, который вызван вращением электрона вокруг ядра, имеет свой собственный угловой момент, одновременно связанный, как они полагали, с вращением. Они предположили, что электрон ещё вращается вокруг своей оси.

— Как наша планета?

— Да. Планету проще проверить, а тут только какие-то проявления, которые говорят о том, что у электрона есть свой собственный момент вращения. Поскольку электрон имеет заряд, то его вращение сопровождается появлением магнитного момента. Вот его-то и называют спином. Spin – это вращение в переводе с английского.

— Это было чисто фундаментальное открытие, которое на тот момент не распространялось ни на какие практические задачи?

— Да. Уленбеку и Гаудсмиту было по 26-27 лет, они написали статью и подали в журнал. Пока готовилась публикация, им было указано «старшими товарищами», что вращение электрона с такой скоростью, чтобы он дал такой магнитный момент, невозможно. Они прибежали в редакцию и сказали, что хотят отозвать статью. Но было уже поздно – материал ушёл в печать. Они испугались: «А как же наша репутация?» – «А у вас её пока нет».

— «И, возможно, уже и не будет»…

— Да. Но всё оказалось правдой, магнитный момент всё-таки был. Репутация учёных была спасена!

— Как же так? Ведь «авторитетные люди» говорили, что это невозможно.

— Невозможно объяснить это вращением вокруг собственной оси. Это не так, как у нашей планеты происходит, по-другому. Это некое внутреннее свойство частицы. А дальше ничего неизвестно. Есть вот такое свойство электрона, оно проявляется в эксперименте. Но внутрь электрона, внутри которого это может проявляться, заглянуть невозможно. Это как «чёрная дыра» – в каких-то явлениях проявляется, но посмотреть, что у неё внутри невозможно.

— Электрон – это самая мелкая частица из возможных, или просто наши возможности пока не позволяют заглянуть ещё дальше?

— Квантовая хромодинамика говорит о том, что частицы, ранее считавшиеся элементарными, вовсе не мельчайшие, они состоят ещё из каких-то блоков. Например, протон состоит из кварков, но электрон считается фундаментальной, неделимой элементарной частицей, относящейся к классу лептонов.

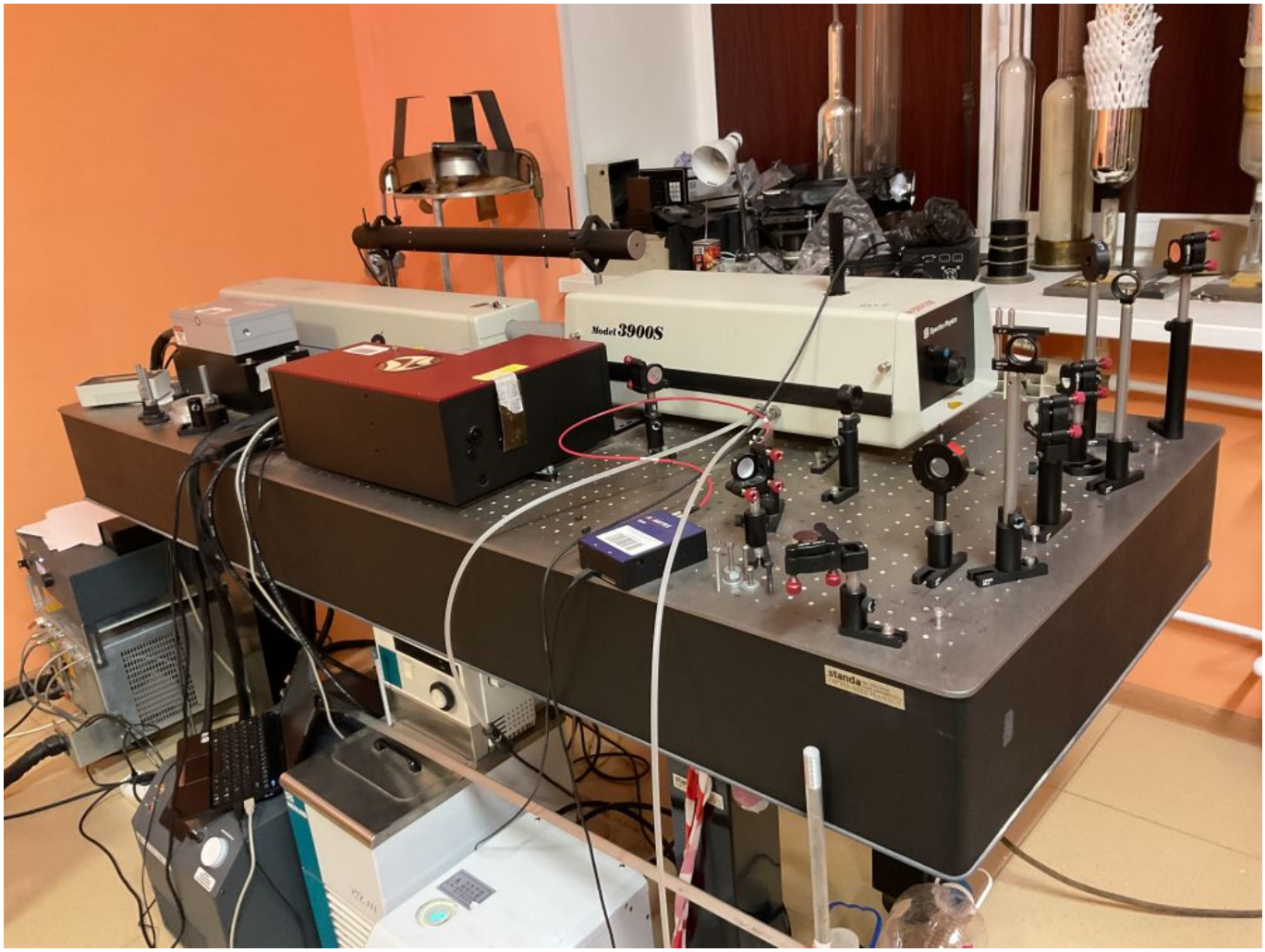
— А вдруг со временем удастся посмотреть, как ей удаётся вращаться?

— Может быть. Но это не совсем вращение. Для того чтобы объяснить эти эффекты вращением электрона, его периферийные части должны двигаться со скоростью, намного превышающей скорость света. Но это невозможно. Поэтому мы говорим о том, что это внутреннее свойство электрона. Чем оно вызвано – мы до сих пор не знаем, хотя им уже пользуемся.

— Как же им воспользоваться?

— Долгие годы спин электронов воспринимался как некая экзотика. Я помню из университетского курса, как нам давали понятие о спине, но подробно об этом не рассказывали. Мы знали, что есть эффекты, которые обусловлены спином, но подробных сведений нам не давали. После открытия этим мало занимались. Потом Исидором Раби в США (1938 год) был открыт ядерный магнитный резонанс (ЯМР), а Евгением Завойским в СССР (1944 год) электронный парамагнитный резонанс (ЭПР). В 1944 году Исидор Раби получил Нобелевскую премию. Методы магнитного резонанса, основанные на спиновых свойствах

электронов и ядер, довольно быстро были внедрены в практику – это диагностика материалов, медицина и т.д. Уже в 1960-е годы французские учёные придумали оптические методы исследования спиновых явлений. Это очень сильно продвинуло теорию и эксперимент явления, понимание механизмов, к которым приводит спин. Руководитель этой французской группы получил в 1965 году Нобелевскую премию. Это была вершина, которую достигли физики к тому времени. А уже в 1970х годах возникла идея попробовать обнаружить спиновые эффекты в полупроводниках. Французский ученый Лампель, как говорят, случайно обнаружил, что в кристалле кремния, самом популярном тогда полупроводниковом кристалле, можно оптически поляризовать электронные спины.



Лазерный стенд. Перестраиваемый лазеры используются для оптической накачки полупроводниковых структур. Фото Н. Лесковой.

Параллельно в нашем физико-техническом институте тоже шли такие работы. Но Лампель был первым. Кстати, он является почетным членом ФТИ. С опозданием в год здесь тоже обнаружили такое же явление оптической спиновой поляризации, позже его назвали оптической ориентацией. Оказалось, что свет тоже несет с собой угловой момент, если его соответствующим образом «приготовить». Фактически у кванта света (фотона) появляется спин. Иногда говорят: «свет имеет спин». Если такой свет поглощается, то он передаёт свой угловой момент частицам, которые при этом появляются. Свет поглощается, и электроны переходят из одних уровней на другие. А ещё есть закон сохранения углового момента. Это такой совершенно жёсткий закон, который выполняется во всех системах – и макроскопических, и микроскопических. Он говорит о том, что угловой момент в замкнутой системе сохраняется. В данном случае это система фотон+кристалл, где фотон поглощается и

передаёт свой угловой момент кристаллу. Тогда спины поляризуются, и мы можем этот эффект каким-то образом наблюдать экспериментально.

— Каким образом?

— Например, по излучению. Если поляризованные по спину частицы излучают свет, то свет оказывается тоже поляризованным. Эта поляризация света несёт информацию о том, что происходит в кристалле при поглощении, при процессах рассеивания, при излучении. Эту очень богатую информацию можно выявить из характеристик излучения.

— Но это всё ещё фундаментальные наблюдения?

— Да. То, что эти явления можно использовать, стало понятно к концу 1980-началу 1990х годов. Идеи были и раньше, но тогда микроэлектроника развивалась по определённому направлению: есть электрон, у него есть заряд, вы прикладываете электрическое поле, можно двигать этот заряд, перемещать из одной точки в другую, захватывать его в какие-то ловушки. На этом была построена вся электроника. А то, что у электрона есть ещё угловой магнитный момент, все знали, но им управлять было очень сложно.

— Зачем нужно им управлять?

— С помощью этих моментов можно управлять информацией. Проблема состояла в том, что зарядом можно было управлять, а магнитным моментом управлять сложнее. И надо было научиться управлять спином, магнитным моментом электрона так же легко и просто, как зарядом.

— Почему нельзя управлять магнитным полем?

— Потому что электрическое поле, которое мы научились так легко создавать, манипулировать им, на спин, как оказалось, не действует. По крайней мере, напрямую. Опосредованно – да, оно может воздействовать, но слабо.

— Но как оказалось, что этим можно как-то управлять?

— Хорошо известно, что управлять спином можно с помощью магнитного поля. Чтобы создать какое-то заметное магнитное поле, нужно намотать катушку и пропустить через неё ток. Но это не прибор, это просто демонстрация явления. К тому же, чтобы там поменять направление магнитного момента, нужно приложить большое магнитное поле и быстро его менять, чтобы его развернуть. Это тоже очень сложно и громоздко, что неприемлемо для приборов. Поэтому нужно было научиться методам, которыми так же легко, как и с зарядом, можно управлять магнитным моментом. Оказалось, что есть спин-орбитальное взаимодействие, через которое можно добиться влияния электрического поля на спин. Для того чтобы этого достичь, нужно научиться это делать оптимальным образом. Нужны какие-то специально приготовленные материалы, структуры в которых это взаимодействие сильнее. Кроме того, необходимы новые методы исследования.

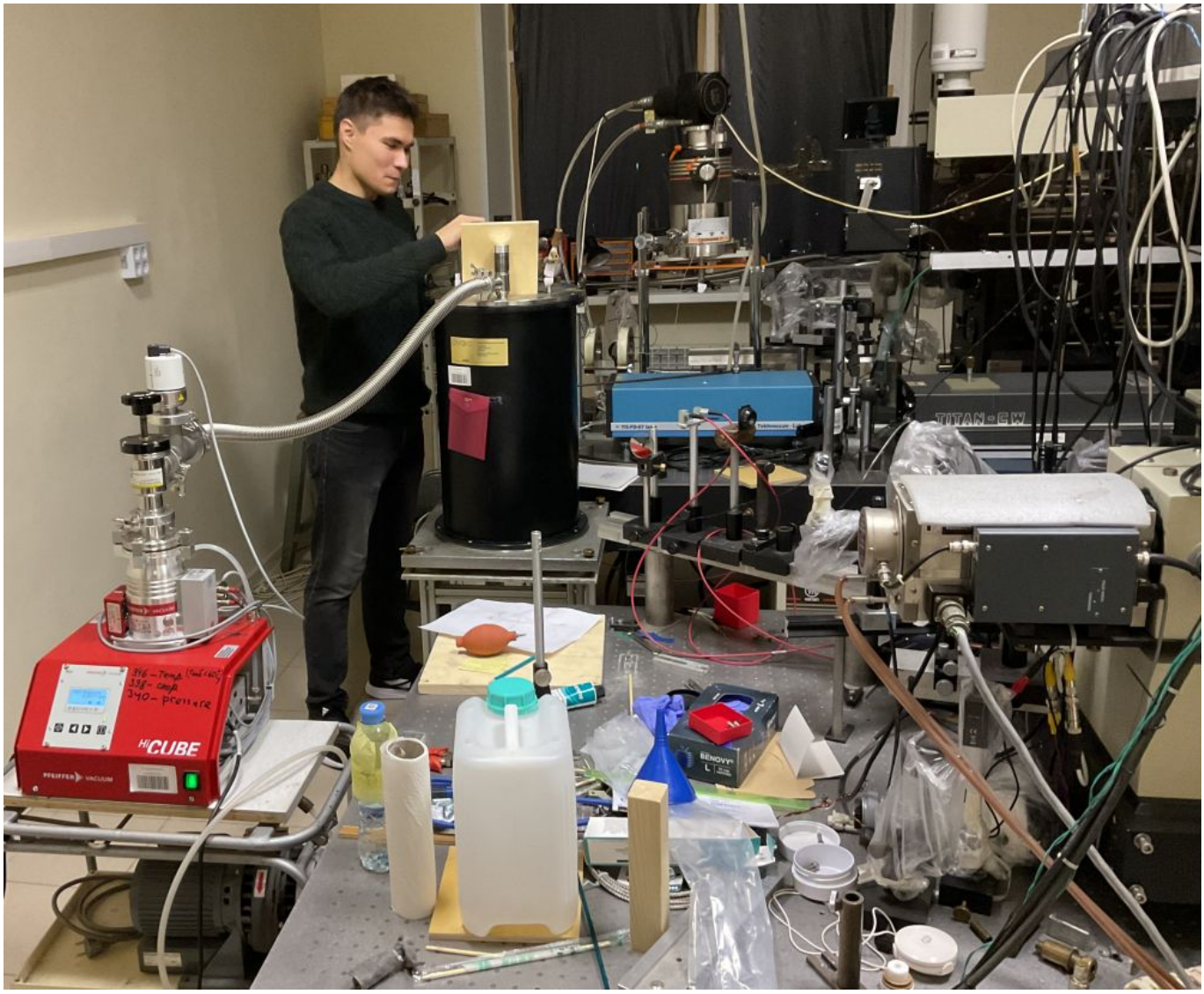
— Когда их создали?

— До сегодняшнего дня они ещё создаются. Точнее, они созданы, но нужна их оптимизация.

— У вас в институте есть такие? Что они собой представляют?

— Есть. Это в первую очередь оптические методы. Вы берёте импульс света и освещаете свой

образец. При этом, если у вас есть магнитный момент, то под действием импульса света этот магнитный момент может развернуться и начать вращение. Фактически вы им управляете. Управлять магнитным моментом – это значит, что вы в нужный момент можете его ориентировать в нужном вам направлении, например, повернуть на нужный угол, создать какое-то количество спинов той или иной конфигурации – всё это означает записать некую информацию. Вы эти спины расположили так, как нули и единички. Спин вверх – это единица, спин вниз – это ноль. Вы их расположили в каком-то порядке, то есть записали информацию. Дальше вам надо эту информацию обрабатывать, то есть развернуть, повернуть и т.д. Это вы делаете, например, с помощью лазерного импульса: обрабатываете информацию, потом её считываете. Собственно говоря, в этом состоит цикл обработки.



Аспирант Максим Давыдов за работой по отладке магнитооптического криостата. Фото Н. Лесковой.

— Как я понимаю, ценность такого рода информации в том, что её можно зашифровать особым образом, и никто «ненужный» её никогда не расшифрует?

— Да. В сегодняшней электронике есть некий предел: чтобы обрабатывать информацию, вам нужно электронами манипулировать – прикладывать электрические поля, перемещать заряд из одной точки в другую. Например, чтобы какие-то вычисления на компьютере провести, вам нужно эти электроны куда-то двигать. Фактически, они переносят ток.

— А в чём тут предел?

— В том, что при переносе тока есть потери. Выделяется тепло. Электрон, когда движется по кристаллу, выделяет тепло в результате столкновений электрона с дефектами кристаллов. Кристалл нагревается. Поэтому в любом компьютере есть довольно мощные вентиляторы, которые призваны его охлаждать. Тепло, которое выделяется при обработке информации, нужно куда-то выводить. Чем мощнее ваш компьютер, тем больше тепла выделяется.

— Что уж говорить про модные супер-компьютеры.

— Да, там тоже надо отводить тепло. И оказывается, что повернуть спины менее энергоемко и энергонезависимо. Для того чтобы обычный компьютер запустить, нужно сначала обновить информацию, чтобы все ячейки восстановились. Если вы используете магнитный момент, то им не нужно предварительная инициализация.

— Но это не квантовый компьютер?

— Квантовый, но на спинах. Это, можно сказать, спиновый компьютер. В отличие от классического, квантовый компьютер оперирует квантовыми состояниями.

— Таких ещё нет?

— Есть такие единичные разработки, но громоздкие – как первые ЭВМ. До промышленного производства они ещё не дошли.

— В чём преимущество такого способа передачи информации? Они быстрее?

— Скорость передачи информации, думаю, такая же. В этом смысле ничего нового не придумали. Преимущество в том, что тратится меньше энергии, и ещё в том, что эта информация лучше сохраняется, меньше риск её потерять.

— Правильно ли я понимаю, что они основаны на тех самых «запутанных состояниях», за которые была получена Нобелевская премия?

— Да. По-английски это не буквально «запутанные», да и эту «запутанность» можно неоднозначно воспринимать. В чем преимущество построения компьютера на спиновых уровнях? Частица, например, со спином ½ (в единицах постоянной Планка) – это два базисных состояния, в нём может быть спин вверх – это плюс ½, спин вниз – это минус ½ (аналог бита информации - «1» и «0»). А если спин куда-то повернут в этой системе, то повернутый спин уже будет суперпозицией базисных состояний. С какой-то вероятностью (зависит от угла поворота) этот «повернутый спин» может принимать значение плюс½, с какой-то – минус ½. Так вот, когда вы используете такие повернутые состояния (кубиты), то у вас увеличивается количество возможностей. Увеличение идёт экспоненциально – n кубитов позволяют выполнять одновременно вычисление над 2n числами параллельно, что приводит к существенному увеличению скорости вычислений квантового компьютера.

— Когда появились сообщения о Нобелевской премии за «запутанные состояния», все заговорили о квантовой телепортации. У обывателей возникли фантастические идеи, что, может быть, телепортация будет возможна физически. Нажал кнопку – и телепортировался. Мне физики объяснили, что это в принципе невозможно. Квант может, а мы – нет. Почему нет? Или, всё-таки, может быть – да?

— Я не специалист в области телепортации. Но хочу сказать, что многие фантастические идеи

со временем становятся реальностью. Взять пример того же Циолковского. Но пока до этого далеко. Для таких ситуаций, что вы назвали, сейчас ближе воздушный городской транспорт. Вы садитесь и перелетаете, минуя пробки. Беспилотные летательные аппараты можно использовать вместо автобусов.

Я бы ещё упомянул спиновый эффект, за который была присуждена Нобелевская премия в 2007 году Альберту Ферту (Франция) и Петеру Грюнбергу (ФРГ) – это гигантское магнитосопротивление. Фактически, это наиболее явное использование спинов на практике, привело к революции в технологии считывания информации с жёстких дисков, сделало возможным носить телефоны и другие устройства в кармане. В чём там дело: когда электроны протекают в кристалле, то они переносят не только заряд, но и спин. Поэтому при переносе электронов идёт электрический ток, а если электроны поляризованы, то может идти и спиновый ток. Но обычно, когда мы берём кристалл, в среднем никакого спина нет. Ноль. Когда пропускаем ток, электронов со спинами вверх и вниз равное количество, спинового тока нет. Для того чтобы появилась спиновая поляризация, нужно либо её создать, например, светом, либо взять магнитный материал, в нём тоже текут поляризованные спины (кстати, это открытие сделал лауреат Нобелевской премии, знаменитый сэр Нэвил Мотт). Так вот, если взять два магнитных материала, привести их в контакт и пропустить ток через такой «бутерброд», то величина тока или сопротивления будет зависеть от того, как направлены магнитные моменты этих двух материалов, параллельно или анти-параллельно.

— То есть в разные стороны?

— Да. Если параллельно, ток проходит свободно. Сопротивление минимальное. Если анти-параллельно, то сопротивление максимальное. На этом эффекте основано явление гигантского магнитосопротивления. Его смысл в том, что, если вы записали какую-то информацию с помощью магнитных моментов, то можно её считывать с помощью структуры с гигантским магнитосопротивлением: в зависимости от того, куда направлен ваш момент, вверх или вниз, его сопротивление будет меняться. Таким образом можно считывать информацию. Раньше тоже считывали, но не с помощью гигантского магнитосопротивления. Это было достаточно громоздко и требовало больших ячеек памяти. А открытие гигантского магнитосопротивления позволило уменьшить размеры этих ячеек памяти в тысячу и более раз. И с этого момента наша техника, наши «гаджеты» уменьшились в размерах и многократно увеличились в объемах памяти и в своих возможностях. Я студентам показываю график – как с годами увеличивался объём памяти на единицу площади. В логарифмическом масштабе это экспоненциальный взлёт после 2000 года. Объём информации на единицу площади увеличился на пять порядков буквально за 10 лет.

— Что в вашем институте делается в этом направлении?

— В нашем институте есть два направления. В моей лаборатории изучаются спиновые свойства квантоворазмерных структур – квантовых ям, квантовых точек, а также гибридных структур полупроводник/ферромагнетик. Мы как раз занимаемся тем, что изучаем системы с заданными свойствами, выбираем, во-первых, объекты, в которых максимально спин-орбитальное взаимодействие и разрабатываем методы генерации, управления и регистрации, оптимизируем эти методы. На основе новых открытий, подходов разрабатываются гибридные структуры полупроводник/ферромагнетик, обладающих одновременно магнитными и ферромагнитными свойствами и позволяющие управлять магнитными характеристиками с помощью электрического поля.



Аспирант Михаил Рагоза' настраивает оптическую установку для проведения поляризационных измерений. Фото Н. Лесковой.

Есть в институте лаборатория физики ферроиков, там изучаются магнито-упорядоченные материалы. Там немного другая ситуация: в магнито-упорядоченном материале намагниченность создана уже природой. Этим магнитным моментом надо управлять, при этом необходимо очень высокое быстродействие. С помощью лазерных импульсов, пикосекундных или даже фемтосекундных, можно обрабатывать информацию, переворачивая эти спины и следя за ними, как они потом «живут», как взаимодействуют с самим материалом и т.д. Эти два направления развиваются у нас в институте. Кстати, по этим направлениям в 2015-2020 годах Институт получил значительную финансовую поддержку – были получены два мегагранта.

— Если бы вас спросил какой-нибудь школьник: «А для чего всё это нужно?» – что бы вы ему ответили?

— Вообще школьники к нам не приходят. Приходят студенты. В основном, они спрашивают, как стать учёным, заведующим лабораторией, а ещё лучше – директором. Что бы я ответил на такой вопрос? Наука сама по себе обладает ценностью. А во-вторых – исторический опыт науки показывает, что любые научные открытия через какое-то время становятся полезны человеку. Они облегчают жизнь, какие-то вещи с помощью науки становится выполнять легче. Те же «гаджеты», интернет. Я часто привожу пример великого Рентгена. Когда Рентген проводил свои опыты, он понятия не имел, где их можно использовать, им двигала любовь к науке. Потом он начал экспериментировать с открытыми им лучами, так называемыми Х-лучами.

Сохранились фотографии кисти жены, полученные с помощью рентгеновских лучей. Видно кости и кольцо на пальце. Понятно, что через какое-то время это всё получило большое практическое воплощение в медицине, в физике, в материаловедении, ещё много где. Кстати, основатель нашего института академик Абрам Федорович Иоффе был учеником Рентгена.

— Приходится ли вам мечтать на тему, как эти спиновые эффекты ещё могут использоваться в будущем?

— Обязательно. Каждый человек, наверное, думает, приносит ли его деятельность какую-то пользу. Мне кажется, нормальный учёный об этом тоже должен думать. Я вижу два направления, в которых мы приносим пользу: во-первых, к нам приходят студенты, потом они становятся аспирантами, кто-то остается, кто-то идёт в производство. Это, на самом деле, очень большое дело – подготовить интеллектуальный потенциал нации, если сказать пафосно. А второе – это чтобы были какие-то приложения. Мы не можем взять и завтра их создать, но мы делаем научные открытия, а дальше – если в стране есть этот потенциал, то они когда-нибудь будут востребованы.

Автор: Наталия Лескова

Источник: nkj.ru