Субир Сачдев

СТРАННЫЕ И СТРУННЫЕ

Недавно открытые состояния материи воплощают в себе то, что Эйнштейн назвал «призрачным дальнодействием». Они не поддаются объяснению, но в последнее время ответы пришли из, казалось бы, никак не связанного с этой проблемой раздела физики — теории струн

Постоянный магнит парит, удерживаемый магнитным полем сверхпроводника, в котором несчетные триллионы электронов формируют огромное объединенное квантовое состояние. Поразительно, но квантовое состояние во многих современных материалах имеет отдаленную связь с математикой черных дыр.

ScPlheontotgirfiacpAh mbye Zraicchaan:yc oZmav is3lagk

ОБ АВТОРЕ

Субир Сачдев (Subir Sachdev) — профессор физики Гарвардского университета и автор книги «Квантовые фазовые переходы» *(Quantum Phase Transitions)*, второе издание которой вышло в 2011 г. в издательстве Кембриджского университета.

Несколько лет назад я оказался там, где не ожидал очутиться: на конференции по теории струн. Моя область исследований — физика конденсированного состояния, изучение материалов, таких как металлы и сверхпроводники, которые мы охлаждаем в лаборатории до температур, близких к абсолютному нулю. Она настолько далека от теории струн, что может показаться другой наукой. Физики-теоретики, работающие в области теории струн, ищут способы описать явления, происходящие с энергиями, намного превышающими энергии, наблюдаемые в лабораторных экспериментах и даже в любой из изученных областей Вселенной. Они исследуют экзотическую физику, управляющую черными дырами и предполагаемыми дополнительными размерностями пространства-времени. Для них гравитация — основная сила природы. Для меня же она несущественна.

Разница в предмете исследований отражается в разделяющей нас культурной пропасти. Физики, работающие в области теории струн, обладают репутацией небожителей, и я отправился на эту конференцию в благоговении перед их математическим искусством. Несколько месяцев я провел за чтением их статей и книг и зачастую просто тонул в предмете. Я был уверен, что буду изгнан как некомпетентный новичок. Со своей стороны теоретики, работающие в области теории струн, имели трудности с некоторыми из простейших понятий моего предмета. Я обнаружил, что объясняю простейшие вещи, о которых до того я рассказывал лишь студентам-старшекурсникам.

Так что же я там делал? В последние годы многие из нас, кто специализируется на физике конденсированного состояния, обнаружили, что изучаемые нами материалы вытворяют вещи, которые мы не могли себе и представить. Они образуют четко различимые квантовые фазы вещества, структура которых обладает рядом удивительнейших природных особенностей. В своей знаменитой статье 1935 г. Альберт Эйнштейн, Борис Подольский и Натан Розен обратили внимание на тот факт, что квантовая теория предполагает «призрачную» связь между частицами, такими как электрон, — явление, которое мы сегодня называем «квантовым перепутыванием». Непонятным образом поведение частиц координируется без какой-либо непосредственной физической связи. ЭПР (как часто называют эту троицу, в которую входят Эйнштейн и его упомянутые коллеги) рассматривали пары электронов, но металлы и сверхпроводники содержат огромное количество электронов — что-то около 10^{23} в типичном лабораторном образце. В ряде материалов сложность описания частиц умопомрачительна, и я потратил много времени, пытаясь в этом разобраться. Проблема эта вышла за пределы чисто академических: сверхпроводники стали важной научно-технической отраслью, и физики бьются над тем, чтобы понять их свойства и возможности.

И вот мои коллеги и я пришли к пониманию того, что теория струн, вероятно, предлагает совершенно неожиданный подход к этой проблеме. В поисках объединения теории элементарных частиц с эйнштейновской теорией гравитации физики, работающие в области теории струн, споткнулись о «дуализм» — скрытые связи между далеко отстоящими друг от друга областями физики *(см.: Малдасена Х. Иллюзия гравитации // ВМН, № 2, 2006)*. Дуализм устанавливает связь между теориями, которые описывают ситуацию, когда квантовые эффекты слабы, а гравитация сильна, и теориями, имеющими дело со случаями, когда, наоборот, квантовые эффекты сильны, а гравитация слаба. Таким образом, он позволяет

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Кроме форм твердых тел, жидкостей и газов материя может принимать множество других различных форм. Электроны, которые перетекают через материалы, сами могут претерпевать фазовые переходы, которые происходят благодаря квантовой природе материи. Сверхпроводники — самый известный пример этого.
- Подобные состояния материи возникают благодаря невообразимо сложной сети перепутанных квантовых состояний электронов — настолько сложной, что теоретики, изучающие эти материалы, зашли в тупик, пытаясь их описать.
- Ответы на часть из этих вопросов пришли из совершенно иной области физики, теории струн — рабочего инструмента теоретиков, которые занимаются космологией и физикой частиц высоких энергий. На первый взгляд, теория струн не может ничего сказать о поведении материалов (не более, чем физик-атомщик может объяснить процессы в человеческом обществе). Тем не менее связь существует.

нам применить идеи и методы, разработанные в одной области, в совершенно иной сфере. Мы можем перевести нашу задачу по квантовому перепутыванию на язык гравитационной проблемы и воспользоваться всем тем, что в теории струн было придумано для понимания процессов, происходящих в черных дырах. Это яркий пример нестандартного мышления.

Скрытые фазы

Чтобы понять весь этот круг идей, вернемся к школьному курсу физики, в котором учителя рассказывают о различных фазах вещества — твердых телах, жидкостях и газах. Мы интуитивно воспринимаем различия между ними. У твердых тел неизменные размеры и форма; жидкости принимают форму сосуда, в который они налиты; а газы похожи на жидкости, но их объем можно легко изменять. Какими бы простыми ни были эти различия, лишь к началу XX в. у нас появилось полное научное понимание фаз вещества. Атомы в твердых телах (кристаллах) организованы в регулярную жесткую решетку, а в жидкостях и газах подвижны.

Однако три упомянутые фазы не исчерпывают все возможности. Твердое тело — это не только решетка атомов, но и стая электронов. Каждый атом жертвует несколько электронов, которые блуждают по всему кристаллу. Когда мы подсоединяем образец к электрической батарее, течет электрический ток. Существенно, что все материалы удовлетворяют закону Ома: ток пропорционален напряжению, деленному на сопротивление. Электрические изоляторы, такие как тефлон, имеют высокое сопротивление; металлы, такие как медь, — низкое. Самые замечательные из материалов — сверхпроводники, сопротивление которых неизмеримо мало. В 1911 г. Хейке Камерлинг-Оннес (Heike Kamerlingh Onnes) открыл их, когда охладил твердый образец ртути до температуры –269° *C*. Сегодня мы знаем сверхпроводники, которые работают в сравнительно «теплых» условиях, при температуре –138° *C*.

Хотя на первый взгляд это и не очевидно, но проводники, диэлектрики и сверхпроводники — различные фазы вещества. В каждой из них стая электронов принимает различные формы. За прошедшие два десятилетия физики открыли дополнительные фазы электронов в твердых телах. Особенно интересный образец не имеет даже названия: физики договорились называть его странным металлом. Он выдает себя необычной зависимостью электрического сопротивления от температуры.

Различие между этими фазами возникает из-за коллективного поведения электронов. Если движение атомов в твердых телах, жидкостях и газах может быть описано классическими принципами ньютоновской механики, то поведение электронов неотвратимо квантовое. Ключевые квантовые принципы, управляющие электронами, — это расширенный вариант принципов, управляющих электронами в атоме. Электроны вращаются вокруг ядра, и их движение описывается как волна, которая распространяется вокруг протона. Электрон может находиться в одном из бесконечного числа возможных состояний с характерным наблюдаемым свойством, таким как энергия. Принципиально важно то, что электрон вращается не только вокруг ядра, но одновременно и вокруг собственной оси. Это вращение может быть либо по часовой, либо против часовой стрелки и не может быть замедлено или ускорено; традиционно мы называем два этих состояния вращения спином, направленным вверх или вниз.

В атомах с более чем одним электроном самое важное правило, управляющее электронами, — это принцип Паули: два электрона не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. (Этот принцип применим ко всем частицам материи, которые физики называют фермионами.) Если вы будете добавлять к атому электроны, каждый новый электрон займет состояние с самой низкой возможной энергией — вроде того, как стакан наполняется водой, начиная со дна.

Такие же рассуждения справедливы в отношении 10^{23} электронов в куске металла. Электроны проводимости, оторвавшись однажды от своих атомов, занимают состояния, которые заполняют весь объем кристалла. Эти состояния можно рассматривать как синусоидальные волны определенной длины, связанной с их энергией. Электроны занимают состояния с самыми низкими разрешенными энергиями, что согласуется с принципом Паули. Все вместе они обычно заполняют почти все состояния с энергией ниже определенного порога, называемого уровнем Ферми.

Приложение электрического напряжения дает некоторым электронам достаточно энергии, чтобы перейти с занимаемого ими состояния на ранее незанятые, энергия которых больше, чем энергия Ферми. Такой электрон может теперь свободно перемещаться. В диэлектрике плотность электронов такова, что все доступные состояния уже заняты. Даже если мы приложим электрическое напряжение, электрон не может перейти в состояние с большей энергией, поскольку таких состояний нет и поэтому ток течь не может.

В сверхпроводниках ситуация становится еще более сложной. Электроны в них не существуют отдельно один от другого. Они связываются в пары, как это описывает теория сверхпроводимости, разработанная в 1957 г. физиками-теоретиками Джоном Бардином, Леоном Купером и Джоном Шриффером (John Bardeen, Leon Cooper, John Robert Schrieffer) и называемая иногда теорией БКШ. На первый взгляд, такая пара микрочастиц кажется весьма странной, поскольку два электрона должны отталкиваться друг от друга. Однако колебания кристаллической решетки косвенным образом создают между ними силы притяжения, которые преодолевают естественное отталкивание. Каждая такая пара ведет себя не как фермион, а как другой тип квантовых частиц, называемых бозонами и не подчиняющихся принципу Паули. Все до одной электронные пары могут перейти в одно и то же состояние с абсолютным минимумом энергии — явление, называемое Бозе-конденсацией (иногда конденсацией Бозе — Эйнштейна). Это как если бы вы наливали воду в стакан, и вместо того чтобы

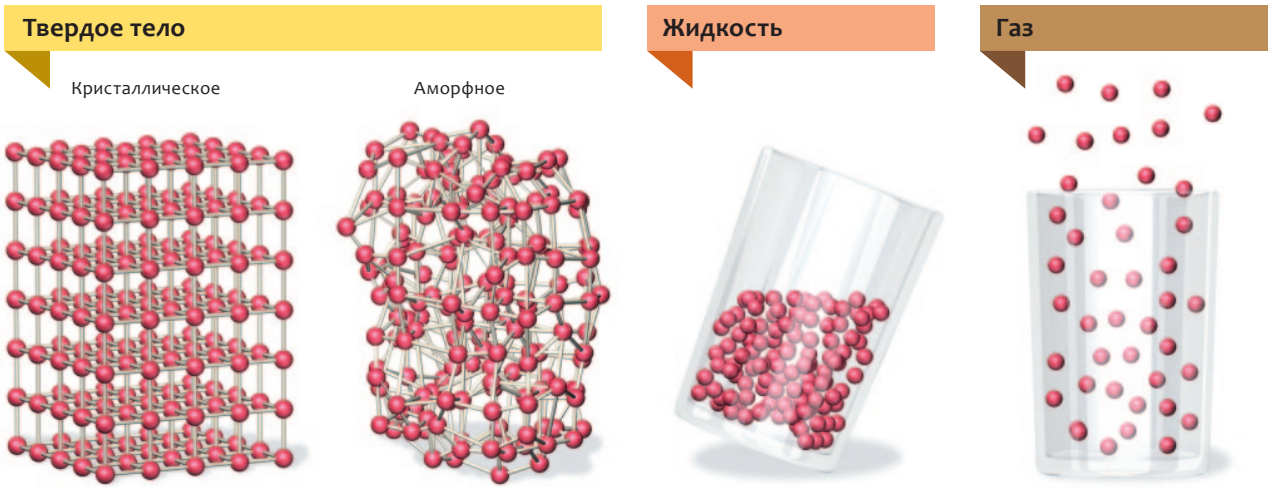
Состояния материи

ВСЕГО ЛИШЬ ОДНА ИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ФАЗ

Квантовая физика дает строительным блокам материи радикально новый способ самоорганизации. Классические фазы — твердое тело, жидкость и газ — предполагают различную организацию атомов и молекул, которая определяется температурой. Квантовые фазы предполагают различную организацию частиц, таких как электроны, которые циркулируют в материалах. Эти фазы управляются такими параметрами, как напряженность электрического поля, определяющими силы, с которыми частицы действуют друг на друга, следовательно, и то, каким образом они самоорганизуются.

Классические фазы

Твердые тела сохраняют размер и форму. В кристаллических твердых телах молекулы выстроены в стабильную регулярную жесткую кристаллическую решетку. В аморфных твердых телах молекулы беспорядочно двигаются, как в жидкости, но остаются на одном и том же месте в течение длительного периода. Жидкости сохраняют объем и меняют форму. Их молекулы мобильны, но все же связаны друг с другом. У газов нет ни постоянного объема, ни формы. Их молекулы мобильны и не связаны друг с другом (или же связаны очень непрочно). Ниже определенных температуры и давления, называемых критической точкой, газ и жидкость перемешиваются и становятся неразличимыми друг от друга.



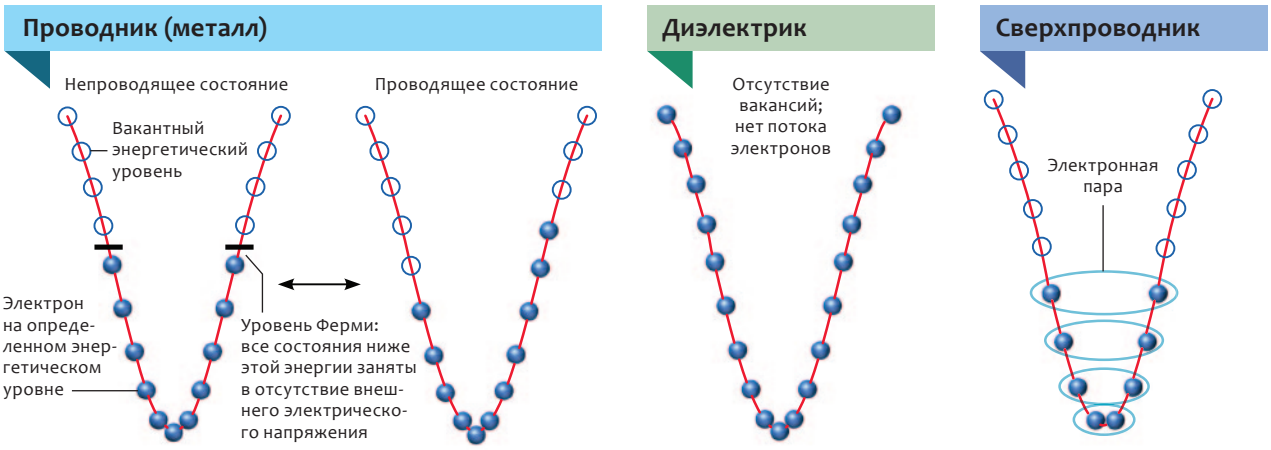
Квантовые фазы

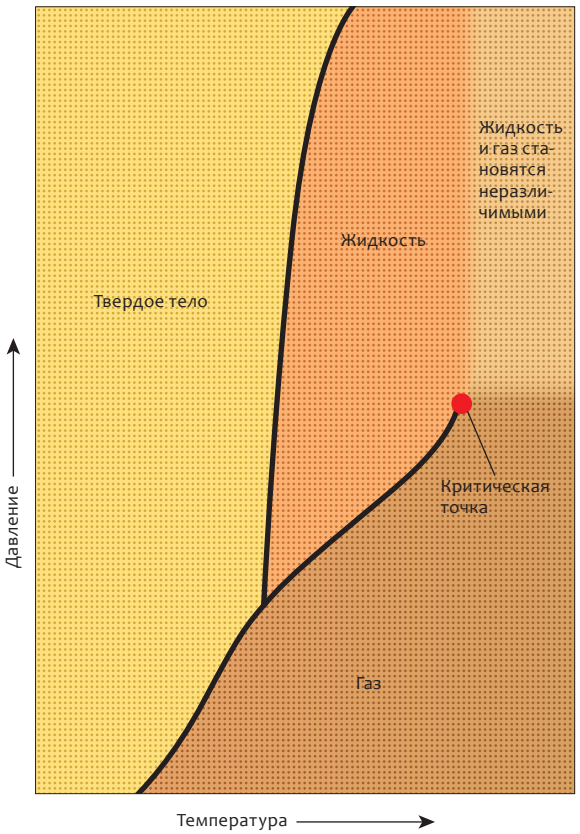
Металлы хорошо проводят электричество. Их электроны носятся от одного атома к другому, и если у атома есть достаточно мест, которые электрон может занять, то последние движутся свободно, как молекулы в газе. Квантовые эффекты ограничивают число электронов, которые могут иметь данную энергию.

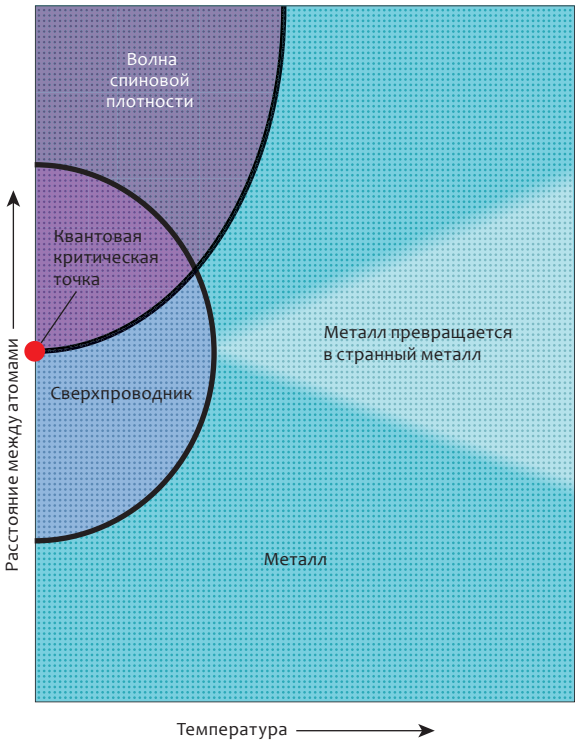
Диэлектрики почти совсем не проводят электричества. Их атомы не обеспечивают необходимых вакансий для электронов проводимости, поэтому электроны остаются привязанными к одному и тому же месту, как если бы сами были твердым телом. Они занимают все имеющиеся энергетические уровни.

Сверхпроводник — это газ не из электронов, а из электронных пар, которые ведут себя как одна частица. Электронные пары образуются в результате квантовых спиновых эффектов или под влиянием волн, распространяющихся вдоль атомной решетки. Такие пары не подчиняются квантовым законам, которые управляют электронами. Все они могут иметь одинаковую энергию — это снимает ограничения, которые удерживают электроны в одном месте, и дает им возможность течь, не испытывая электрического сопротивления.

Волна спиновой плотности *(не показана)* — это материал (иногда диэлектрик, иногда сверхпроводник) с весьма необычной картиной спинов электронов. Половина из них имеет спин, направленный вверх, а другая половина — вниз, чередующимися рядами. Иногда образуется странный металл — волна спиновой плотности достигает экстремальных значений. Вероятность для каждого отдельного электрона иметь спин, направленный вверх или вниз, — 50/50 и никак иначе. Все электроны в странном металле испытывают взаимную квантовую перепутанность и ведут себя не как отдельные частицы, и даже не как пары, а как ансамбль из триллионов и более частиц.







заполнить стакан доверху, она образовывала бы на дне тонкий слой льда, который поглощал бы всю наливаемую вами жидкость, не становясь толще.

Если к такому материалу приложить внешнее электрическое напряжение, оно поднимет электронные пары в состояние с чуть более высокой энергией, и потечет электрический ток. Это состояние с чуть более высокой энергией во всех остальных отношениях пустое, и нет ничего, что могло бы препятствовать течению электронных пар. Таким образом, сверхпроводник передает ток без сопротивления.

Путь к критической точке

Успех квантовой механики в объяснении свойств металлов, диэлектриков, сверхпроводников и других материалов, таких как полупроводники (основа современной микроэлектроники), привел многих физиков в начале 1980-х гг. к выводу, что они достигли почти полного понимания поведения электронов в твердых телах и там не осталось места для новых крупных открытий. Эта уверенность была поколеблена открытием высокотемпературных сверхпроводников.

Примером может служить кристалл арсенида бария и железа *($BaFe_2As_2$)* в котором физики-экспериментаторы часть атомов мышьяка заместили атомами фосфора. При низких температурах этот материал — сверхпроводник, и физики полагают, что он подчиняется теории, аналогичной БКШ, за исключением того, что силы, притягивающие электроны друг к другу, возникают не в результате колебаний кристаллической решетки, а из-за физических явлений, связанных со спином электрона. При небольшой добавке фосфора этот материал образует состояние, называемое волной спиновой плотности. У половины состояний атомов железа спин электрона с большей вероятностью будет направлен вверх, а у другой половины наоборот вниз. По мере того как вы увеличиваете содержание фосфора, сила волны спиновой плотности уменьшается. Она совсем исчезает, когда вы заместите критическое количество мышьяка, примерно 30%. В этой точке спин электрона с равной вероятностью направлен вверх и вниз на обеих частях, что имеет важные следствия.

Первые признаки загадочной природы такого квантового критического состояния — это поведение системы, когда экспериментаторы поддерживают содержание фосфора постоянным, равным 30%, и повышают температуру. В результате получается и не сверхпроводник, и не волна спиновой плотности, а странный металл.

Основная новая идея, необходимая для описания квантовой критической точки, а также сверхпроводников и странных металлов вблизи нее, — это именно то свойство квантовой механики, которое так взбудоражило Эйнштейна, Подольского и Розена, — квантовая перепутанность. Вспомним, что квантовая перепутанность — это суперпозиция двух состояний, например таких, когда спин одного электрона направлен вверх, а другого вниз, и наоборот. Представим себе, что по одному электрону расположено на двух атомах

железа. Электроны неразличимы в принципе, поэтому невозможно сказать, который из электронов обладает спином вверх, а который — спином вниз. Оба они с равной вероятностью могут иметь спин, направленный вверх или вниз. Все, что мы в состоянии сказать, — это то, что если в результате измерения окажется, что один из электронов имеет спин, направленный вверх, то другой гарантированно будет иметь спин, направленный вниз. Они в высшей степени антикоррелированы: если мы знаем направление одного, то знаем направление и другого.

На первый взгляд квантовая перепутанность может и не показаться странной. Антикорреляция присутствует достаточно часто: если у вас есть пара туфель и вы оставили одну из них у парадного входа, а другую у черного, то если вы обнаружите левую туфлю в одном месте, ничего загадочного не будет в том, что другая будет правой. Однако в квантовом мире ситуация будет принципиально иной. Туфля изначально либо левая, либо правая, даже если вы не знаете какая именно, но у электрона нет определенного спина до акта измерения. (Если бы он у него был, мы могли бы выяснить, какой именно, проведя определенную последовательность измерений электрона.) В известном смысле электрон имеет спин, направленный одновременно и вверх и вниз до тех пор, пока его не вынуждают сделать выбор.

Загадка заключается в причине, по которой электроны остаются антикоррелированными. Когда один электрон выбирает себе спин, другой делает то же самое. Откуда они знают, как выбрать противоположные направления? Похоже, что информация о квантовом состоянии атома 1 мгновенно становится известна атому 2, независимо от того, как далеко он расположен от первого. И действительно, ни один из этих атомов не имеет собственного квантового состояния, его имеет только их пара. Это и есть нелокальность, призрачное дальнодействие, которое Эйнштейн считал столь неприятным фактом.

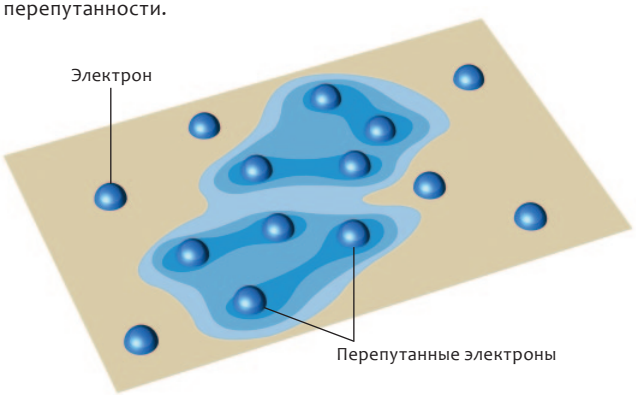
Каким бы ни был этот факт, но нелокальность была проверена многократно в реальных экспериментах. Эйнштейн и его соавторы, очевидно, нащупали самую парадоксальную и неожиданную сторону квантовой механики. И в минувшем десятилетии физики начали понимать, что нелокальность объясняет причудливые свойства странных металлов. Вблизи квантовой критической точки не только отдельные электроны, но и электронные пары уже не ведут себя независимо, а все в целом становятся квантово перепутанными. Те же самые рассуждения, которые ЭПР использовали в отношении двух электронов, теперь применяются ко всем 10^{23}. Соседние электроны перепутаны друг с другом, такая пара, в свою очередь, перепутана с соседней парой и т.д., образуя гигантскую сеть взаимосвязей.

Такое же явление наблюдается и в других материалах. Классификация и описание подобных перепутанных квантовых состояний — неприступная крепость, с которой мы сталкиваемся при разработке теории, описывающей эти новые материалы. Данная сеть настолько сложна, что мы не в состоянии описать ее явным путем.

Связь с теорией струн

СЕТЬ КВАНТОВОГО ПЕРЕПУТЫВАНИЯ

По причинам, которые физикам еще предстоит понять, квантовые фазы вещества содержат латентную пространственную размерность, которая может появляться при фазовых переходах, как фигурки в книжке-раскладушке при перелистывании страниц. Эта размерность становится очевидной при математическом описании связей между частицами или квантовой перепутанности.



Квантовое перепутывание электронов

Квантовое перепутывание означает, что несколько квантовых частиц действуют совместно как единое и неделимое целое. Как правило, физики говорят о квантовом перепутывании двух частиц или, возможно, небольшого их количества, но в материалах, в которых происходит переход из одной квантовой фазы в другую, перепутанным оказывается гигантское их число.

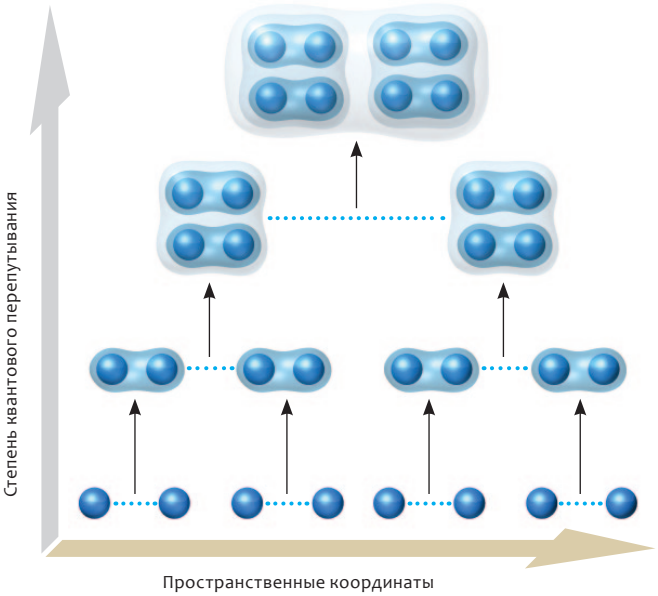
Мои коллеги и я боялись, что теория этих квантовых фаз материи так и будет все время ускользать из наших рук. Это было до того, как мы узнали о теории струн.

Запутавшись в струнах

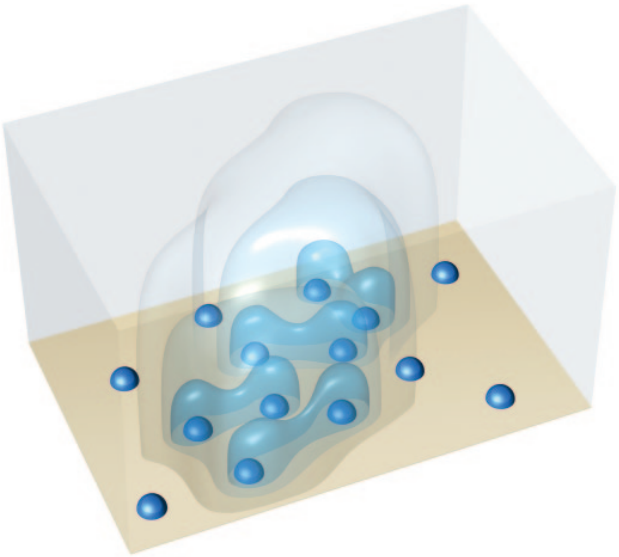
На первый взгляд, теория струн не имеет ничего общего с перепутанными квантовыми состояниями множества электронов. Она имеет дело с микроскопическими струнами, которые вибрируют подобно струнам миниатюрной гитары. Различные моды колебаний представляют собой различные элементарные частицы. Струнная природа материи становится очевидной при чрезвычайно высоких энергиях, зародившихся лишь спустя мгновения после Большого взрыва, а также вблизи черных дыр очень большой плотности. В середине 1990-х гг. физики, работавшие в области теории струн, такие как Джозеф Полчинский (Joseph Polchinski) из Института теоретической физики им. Кавли Калифорнийского университета в Санта-Барбаре, поняли, что их теория предсказывает нечто большее, чем струны. Она, помимо прочего, предполагает существование так называемых бран — поверхностей, к которым струны прилипают, как мухи к липучке. Эти мембраны представляют обширное царство физики, лежащее в области энергий меньших, чем у высокоэнергетических частиц, для описания которых данная теория изначально разрабатывалась.

То, что для нас выглядит как частица, просто точка, в действительности, возможно, будет концом струны, протянувшейся от браны через дополнительную

Illustrations by George Retseck



Иерархия квантового перепутывания
Странным образом процесс квантового перепутывания ведет себя математически в точности так же, как расстояние в пространстве. Во многом подобно тому, как движение в пространстве состоит в прохождении промежуточных точек, для перехода от квантового перепутывания двух частиц к триллионам требуется, чтобы две уже перепутанные перепутались с двумя другими, получившаяся в результате четверка частиц перепуталась с другой четверкой, и т.д.



Дополнительное пространственное измерение
Итак, глубина квантового перепутывания сама по себе ведет себя как скрытое пространственное измерение, расположенное над и вне трех обычных пространственных измерений, в которых находится электрон. Используя эту математическую аналогию, теоретики, изучающие квантовые фазы вещества, могут воспользоваться результатами физиков, работающих в области теории струн, которые изучают дополнительные пространственные измерения.

размерность пространства. Мы можем рассматривать Вселенную как состоящую из точечных частиц, движущихся в четырехмерном пространстве со сложным набором взаимодействий между частицами, или же как сформированную из движущихся в пятимерном пространстве-времени струн, прикрепленных к бранам. Оба ракурса — эквивалентное, или дуальное, описание одной и той же ситуации. Замечательно то, что эти описания дополняют друг друга. Когда точечные частицы безнадежно сложны, струны могут вести себя достаточно просто. И наоборот, когда частицы просты, струны громоздки и неповоротливы.

Для моих целей картина, где струны пляшут в некоем пространстве-времени большой размерности, несущественна. Мне безразлично, насколько правильно теория струн описывает физику элементарных частиц при высоких энергиях. Важно то, что дуализм позволяет мне заменить не поддающуюся решению математическую задачу более простой.

Еще несколько лет назад я посещал главным образом конференции по физике конденсированного состояния, на которых мы спорили о различных перепутанных квантовых состояниях, которые электроны могут образовывать в недавно открытых кристаллах. Теперь я вдруг обнаружил, что пью кофе с коллегами, работающими в области теории струн, пытаясь осмыслить их абстрактное и причудливое описание струн и бран и применить эти идеи к вполне земным задачам, возникающим в результате настольных измерений новых материалов. Более того, это дорога с двусторонним движением. Я полагаю, что наша интуиция и опыт, приобретенный в экспериментах с квантовыми фазами электронов, окажутся полезными тем, кто занимается теорией струн при описании черных дыр и другой экзотики.

Когда электроны в кристаллах имеют лишь ограниченную степень перепутанности, их все еще можно рассматривать как частицы (отдельные электроны или их пары). Однако когда значительное число электронов оказываются сильно перепутанными друг с другом, их больше нельзя рассматривать как частицы, и традиционные теории испытывают трудности с предсказанием того, что будет происходить. При нашем новом подходе мы описываем эти системы как струны, которые распространяются в дополнительном пространственном измерении.

Мой коллега по Гарвардскому университету Брайан Свингл (Brian Swingle) провел аналогию между дополнительным пространственным измерением и сетью перепутанных квантовых частиц. Движение вверх и вниз по этой сети математически эквивалентно движению в пространстве. Струны могут извиваться и соединяться друг с другом внутри дополнительного измерения, а их движение отражает процессы квантового перепутывания частиц. Короче говоря, призрачные связи, так беспокоившие Эйнштейна, приобретают смысл, когда вы рассматриваете степень квантового перепутывания как расстояние в дополнительном пространственном измерении.

Странные братья

Практическая польза дуализма заключается в том, что в теории струн создана большая библиотека решений математических задач, охватывающих диапазон от динамики частиц в горниле Большого взрыва до распространения квантовых полей на кромке черных дыр. Те из нас, кто изучает квантовые фазы вещества, могут пойти в библиотеку, найти возможное решение конкретной задачи и перевести его (воспользовавшись математическим дуализмом) с языка теории струн на язык задач квантовой перепутанности.

Как правило, мы фокусируем свое внимание на состоянии с самой низкой энергией при абсолютном нуле, но мы легко можем описать вещество при ненулевых температурах, воспользовавшись техникой, которая, возможно, покажется слишком радикальной: мысленно добавив к струнам черную дыру. Тот факт, что сюда привлечены черные дыры, показывает, насколько замечателен этот дуализм. Никто не строит предположений, что квантовые фазы вещества содержат черные дыры в буквальном смысле, связь здесь гораздо более тонкая. Как хорошо известно, Стивен Хокинг из Кембриджского университета показал, что каждая черная дыра имеет определенную собственную температуру. Снаружи она выглядит как тлеющий кусок горячего угля. По логике дуализма, соответствующая система конденсированного состояния также должна быть горячей, результатом чего должно быть превращение волны спиновой плотности или сверхпроводника в странный металл.

Эти методы позволили добиться прогресса в объяснении свойств странных металлов и других состояний материи, но больше всего они помогли разобраться с переходом из состояния сверхтекучести в состояние диэлектрика. Сверхтекучая жидкость очень похожа на сверхпроводник — за исключением того, что состоит из электрически нейтральных атомов. Она проявляет себя не тем, что электрическое сопротивление равно нулю, а тем, что течет, не испытывая сопротивления. В последние годы экспериментаторы разработали новые замечательные методы получения искусственных сверхтекучих жидкостей. Они формируют решетку из взаимно пересекающихся под прямым углом лазерных пучков и впрыскивают в нее триллионы атомов, охлажденных до экстремально низкой температуры. Сначала атомы ведут себя как сверхтекучая жидкость: они свободно перемещаются из одного узла решетки к другому. Когда экспериментаторы повышают мощность лазера, атомы становятся менее подвижными и сверхтекучая жидкость внезапно превращается в изолятор.

Экспериментаторы отслеживают этот переход, измеряя течение атомов при приложении внешнего давления. В фазе сверхтекучей жидкости они текут без сопротивления, в фазе диэлектрика они почти не текут, а в переходном состоянии это происходит, но странным образом. Например, если экспериментаторы убирают внешнее возмущение, атомы останавливаются со скоростью, которая зависит от температуры и постоянной Планка, фундаментального параметра квантовой теории, который, однако, не влияет на поведение атомов в других фазах. Мы объясняем такое поведение привлечением квантовой жидкости с критическим фазовым переходом в качестве аналога или призрачного двойника черной дыры.

Этот дуализм имеет и свою обратную сторону. По самой своей природе он преобразует сложное в простое. Однако мы не всегда хотим трансформировать задачу: мы желаем понять сложность такой, какая она есть. Дуализм — это математический черный ящик, и он скрывает от нас детали сложных перепутанных квантовых состояний и того, как эти состояния образуются в реальных материалах. Объяснение того, что же происходит в действительности, пока еще находится в младенческой стадии. Для тех из нас, кто привык думать в терминах динамики электронов в кристаллах, теория струн обнажила новые свежие перспективы, открыв динамику сложных квантовых состояний, в том числе квантовую перепутанность. В тех же, кто занимается теорией струн, это пробудило интерес к изучению фаз квантовых материалов — явлений, отстоящих очень далеко от физики ранней Вселенной или того, что происходит в ускорителях частиц высоких энергий. Странное взаимное влияние этих направлений мысли продемонстрировало нам удивительное единство природы. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

■ Solving Quantum Field Theories via Curved Spacetimes. Igor R. Klebanov and Juan M. Maldacena in Physics Today, Vol. 62, No. 1, pages 28–33; January 2009. http://dx.doi.org/10.1063/1.3074260

■ Entanglement Renormalization and Holography. Brian Swingle. Добавлено на сайт arxiv.org 8 мая 2009 г.: http://arxiv.org/abs/0905.1317

■ What Black Holes Teach about Strongly Coupled Particles. Clifford V. Johnson and Peter Steinberg in Physics Today, Vol. 63, No. 5, pages 29–33; May 2010. http://dx.doi.org/10.1063/1.3431328

■ Quantum Criticality. Subir Sachdev and Bernhard Keimer in Physics Today, Vol. 64, No. 2, pages 29–35; February 2011. http://arxiv.org/abs/1102.4628

■ What Can Gauge-Gravity Duality Teach Us about Condensed Matter Physics? Subir Sachdev in Annual Review of Condensed Matter Physics, Vol. 3, pages 9–33; March 2012. http://arxiv.org/abs/1108.1197