

# НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ КАК ЗЕРКАЛО СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

Нобелевская премия по физике за этот год присуждена трем американским физикам -- двум экспериментаторам (Daniel Tsui и Horst Stormer) и теоретику (Robert Laughlin). Формулировка Нобелевского комитета такова: "За открытие новой формы квантовой жидкости с дробно заряженными возбуждениями". Из-за ее витиеватости в первый момент даже не все физики, занимающиеся квантовым транспортом в полупроводниках, поняли, что за этой формулировкой спрятано открытие и объяснение дробного квантового эффекта Холла. Если вспомнить, что в 1985 году Нобелевская премия была присуждена за открытие целочисленного квантового эффекта Холла, ситуация представляется уникальной. Два, по существу, родственных явления отмечены двумя Нобелевскими премиями. Даже среди физиков, занимающихся квантовым эффектом Холла, разгорелся спор по поводу правильности решения Нобелевского комитета. Отмеченная ситуация это хороший повод обсудить: за что же дают Нобелевские премии по физике на исходе двадцатого столетия и незадолго до столетнего юбилея самой престижной премии в мире.

Сначала немного истории. Год назад отмечался пятидесятилетний юбилей изобретения биполярного транзистора, давшего старт эре полупроводниковой электроники. Первые годы после изобретения все помыслы специалистов были направлены на весьма прозаичные вопросы, связанные в основном с очисткой полупроводниковых материалов от разного рода примесей и дефектов -- задачей чисто практической, так как прежде всего от чистоты полупроводниковых структур зависела надежная работа приборов. В то время вряд ли кому-нибудь приходила в голову мысль, что решение этой задачи станет основой будущих открытий в области чистой физики. Но именно бурное развитие полупроводниковой технологии позволило физикам реализовать в 1966 году двумерный электронный газ

-- физическую систему, не существующую в природе. Экспериментальная реализация такой системы стала возможной благодаря созданию в начале шестидесятых годов полевого МОП-транзистора (аббревиатура МОП означает металл-окись-полупроводник). В настоящее время это основной элемент всех больших интегральных схем. Скажем, все процессоры Pentium, о которых слышали даже домохозяйки, созданы на основе так называемых компланарных МОП-интегральных схем, основным элементом которых является как раз МОП-транзистор. Создание высококачественных МОП-транзисторов было первой и самой важной победой в долгой и упорной борьбе технологов за чистоту полупроводниковых структур. Этим тотчас же воспользовались физики, исследующие многоэлектронные системы, взявшие МОП-транзистор и поместившие его в гелиевый криостат. Как только прибор был охлажден до гелиевых температур, выяснилось, что проводящий инверсионный канал этого прибора представляет собой двумерный электронный газ, то есть газ, у которого одна из трех степеней свободы, нормальная к поверхности полупроводника, заморожена размерным квантованием, в то время как две остальные, соответствующие движению вдоль поверхности, остаются свободными для классического движения электрона. Реализация такой двумерной системы стимулировала появление первых теоретических работ, в которых анализировался вопрос -- к чему должна привести двумеризация электронного газа. И здесь особо следует отметить вклад теоретиков Института физики полупроводников СО РАН, возглавляемых профессором А.Чапликом. В конце шестидесятых -- начале семидесятых годов они получили целый ряд пионерных результатов в изучении рассеяния и энергетического спектра двумерных электронов, ставших в настоящее время классическими. Особенно интересные свойства у двумерного электронного газа возникли при приложении сильного магнитного поля вдоль нормали к плоскости свободного движения электронов. Это не удивительно, если учесть, что магнитное поле благодаря квантованию Ландау приводило к тому, что двумерная электронная система становится полностью дискретным объектом. Здесь необходимо отметить, что

впервые обратил внимание на аномальные особенности поведения двумерной электронной системы в сильном магнитном поле советский теоретик Б.А.Тавгер в 1966 году. Интенсивные более чем десятилетние исследования этих свойств привели к открытию в 1980 году замечательного явления -- квантового эффекта Холла. Суть этого явления заключается в том, что при низких температурах и в сильных магнитных полях холловское сопротивление двумерного проводника растет не линейно с увеличением магнитного поля как это предсказывает классическая теория эффекта Холла, а ступенчатым образом, причем в области ступеньки сопротивление определяется только фундаментальными константами -- постоянной Планка и зарядом электрона и целым числом с точностью до восьмого знака после запятой. Надо сказать, что за три года до экспериментального открытия квантования холловского сопротивления ступеньки в холловском сопротивлении были предсказаны теоретиком из лаборатории А.Чаплика кандидатом физико-математических наук М.Энтиным. Ему не хватило немного удачи, которая часто все и решает, чтобы догадаться, что величина сопротивления в области ступенек определяется только постоянной Планка и зарядом-электрона.

Пока физики интенсивно изучали свойства двумерного электронного газа в МОП-транзисторе, борьба за чистоту полупроводниковых структур продолжалась, и наконец в конце семидесятых годов была предложена технология получения двумерного электронного газа в гетеропереходе, то есть вблизи границы двух полупроводников. Почему эта граница стала более перспективной с точки зрения чистоты структуры и почему она так важна для фундаментальных исследований поведения электрона в твердом теле? Здесь необходимо небольшое отступление, касающееся зонной теории твердого тела. Эта теория явилась одним из триумфов квантовой механики. Она позволила объяснить не только разделение твердых тел на металлы, полупроводники и изоляторы, но также дать количественное описание энергетического спектра электронов. Один из самых замечательных результатов этой теории - приближение эффективной массы. В соответствии с ним мы во многих

случаях можем рассматривать электроны в кристалле как свободные и невзаимодействующие, но с измененной массой (перенормированной, как любят говорить физики-теоретики) по сравнению со свободным электроном. Эта масса может быть даже отрицательной и тогда мы будем иметь дело с "дыркой". Представление об электроне и дырке и сейчас ключевое, скажем, для инженера в любой полупроводниковой фирме. Но физики -- это все же не инженеры. И они уже в процессе создания зонной теории понимали все недостатки такого одноэлектронного рассмотрения, понимали и необходимость как-то учитывать эффекты электрон-электронного взаимодействия, так как в кристалле мы всегда имеем дело с многоэлектронной системой. Одним из первых, кто обратил внимание на этот вопрос еще в разгар создания самой квантовой механики был один из ее столпов -- Ю.Вигнер, выдвинувший гипотезу электронного кристалла, заключающуюся в том, что если каким-нибудь образом уменьшать плотность электронов в кристалле, то рано или поздно кулоновская энергия взаимодействия окажется больше кинетической энергии электрона и тогда электроны должны будут образовать кристаллическую решетку. Несмотря на принципиальную важность гипотезы Вигнера, ее не удавалось проверить по одной простой причине -- природа не подарила физикам материала, где бы можно было реализовать условия, необходимые для образования вигнеровского кристалла. Двумерная электронная система в МОП-транзисторе казалась, на первый взгляд, именно такой удобной системой. Впервые обратил внимание на этот факт А.Чаплик, предложивший искать двумерный вигнеровский кристалл в инверсионных слоях МОП-транзисторов. Однако здесь всех ожидал неприятный сюрприз -- примеси и дефекты в МОП-структуре, незаметные при работе в интегральных схемах, сделали невозможным реализацию двумерного вигнеровского кристалла. Вот тогда-то внимание физиков и привлек двумерный газ в гетеропереходе, состоящем из арсенида галлия и одного из его соединений. Как показали работы одного из выдающихся российских физиков академика Ж.Алферова и его учеников, выполненные в конце шестидесятых годов, такой гетеропереход можно сделать практически свободным от поверхностных состояний,

являющихся основным источником дефектов в МОП-транзисторе. Благодаря еще одной ключевой идее - селективного легирования гетеропереходов, реализованной в конце семидесятых сотрудниками Bell Laboratory, физикам удалось получить в руки двумерную систему намного более чистую, чем в МОП-транзисторе, в которой эффекты взаимодействия уже играли действительно доминирующую роль. Сразу же поиски вигнеровского кристалла возобновились с новой силой, причем в области сильных магнитных полей, так как к тому времени усилиями многих теоретиков было показано, что магнитное поле способствует возникновению упорядоченного состояния электронной системы. И наконец в 1982 г. через два года после открытия целочисленного квантового эффекта Холла уже упомянутыми Д.Цуи, Х.Стормером, а также А.Госсардом был открыт дробный квантовый эффект Холла. Этот эффект был очень похож на целочисленный -- наблюдались ступеньки в зависимости от холловского сопротивления, и величина его определялась совершенно той же комбинацией постоянной Планка и заряда электрона. Однако теперь они соответствовали не целым числам, а дробным, причем ступеньки появлялись только для нечетных дробей. И этот факт самый удивительный, так как целочисленный квантовый эффект Холла все же можно было объяснить на основе возникновения энергетической щели в спектре электронов из-за квантования Ландау, известного любому студенту-физику. Дробное же квантование возникало при частичном заполнении уровня Ландау, когда ни о какой щели не могло быть и речи. Вот тогда-то гипотеза вигнеровского кристалла вновь стала предметом обсуждения. Однако вскоре было показано, что в условиях, в которых наблюдается дробное квантование, электронной системе все же невыгодно образовывать кристалл. С другой стороны "калибровочные соображения", высказанные для объяснения целочисленного квантового эффекта Холла, при их применении к дробному квантованию, немедленно вели к предположению о том, что в системе должны существовать квазичастицы с дробным зарядом. И вскоре американский теоретик Роберт Лафлин предложил для объяснения дробного квантового эффекта Холла модель несжимаемой квантовой жидкости, в которой действительно могут существовать

квазичастичные возбуждения, переносящие дробный заряд. Надо сказать, что предположение о дробном заряде подвергалось критике с самого начала, тем более, что дробное квантование можно было бы объяснить и без предположения о наличии квазичастиц с дробным зарядом. И сейчас в этом вопросе нет полной ясности. Более того, недавно теоретиками была предложена новая очень красивая модель для объяснения дробного квантового эффекта Холла. И в этой модели тоже фигурирует квазичастица, называемая композитным фермионом, которая составлена из электрона и четного числа квантов магнитного потока. То есть мы сталкиваемся с поразительным фактом, когда одно объяснение дробного эффекта Холла требует разъять электрон на части, а другому, наоборот, одного электрона недостаточно. Тем не менее Нобелевская премия вручена именно за открытие квантовой электронной жидкости, в которой существуют квазичастицы с дробным зарядом. И в этом есть своя закономерность, отражающая постмодернистское лицо современной физики. Об этом мне и хотелось поговорить в заключение.

После второй мировой войны мир оказался свидетелем полного триумфа квантовой механики. Оказалось, что она дает не только новую картину мироздания, но также может иметь практическое применение. Изобретение транзистора и лазера -- яркое тому свидетельство. Именно практическая важность квантовой механики стимулировала взрывной рост физики конденсированного состояния в пятидесятых -- шестидесятых годах. В те времена физики ощущали себя если не первооткрывателями, то, по меньшей мере, людьми первого сорта. Престиж физики был высок как никогда. Но постепенно круг интересных задач сужался и многие начали поговаривать о кризисе идей и т.д. И это было действительно так. Создание МОП-интегральных схем ознаменовало собой конец эпохи "великих географических открытий" в физике твердого тела. Дальше нужны были только чистота кремниевых фабрик и борьба за чистоту. Но это уже был удел инженеров-физиков. Пусть физиков, но инженеров. Как показало время, физика твердого тела на этом не кончилась, а просто стала другой. На смену поиску неразгаданных тайн твердого тела пришла игра



- игра с электроном. И первой "электронной" игрушкой оказался как раз МОП-транзистор. Сейчас, благодаря достижениям нанотехнологии, изоциренная игра с электроном составляет основное содержание и смысл современной физики конденсированного состояния. Безусловным фаворитом этих игр остается дробный квантовый эффект Холла, изучение которого из-за высочайших требований к чистоте и однородности структур доступно лишь немногим лабораториям в мире. К слову, в России только Институт физики полупроводников СО РАН обладает как технологическими, так и экспериментальными возможностями для исследования дробного квантового эффекта Холла. Последний эксперимент, проведенный в институте, был посвящен проверке одного из интереснейших предсказаний уже упомянутой теории композитных фермионов и бозонов, которое говорит о двойственности заряда и магнитного потока в режиме квантового эффекта Холла. Однако при всей красоте и целочисленности и дробного квантового эффекта Холла и теорий, объясняющих их, они не могут претендовать на ту всеобщность и глубину, какими, например, характеризовались открытия, родившие квантовую механику. И тем не менее ничто так ярко не отражает особенности современной физики, ее постклассический и постквантовый характер как эта игра с электронами и волновыми функциями. Именно она продлила век физики и в конце двадцатого века приобрела форму постмодернистской игры в классическую и квантовую механику. Я уже второй раз употребил слово "постмодернистский", которое мы чаще привыкли слышать в разговорах о современном искусстве. Но мне оно кажется столь же адекватным при характеристике современной физики. Физика, казавшаяся не в столь долгие времена олицетворением глубоких детерменистских и логических связей в природе и в мышлении, сейчас в полной мере отражает многоликий и многозначный, неуловимый и туманный, короче -- постмодернистский лик истины конца двадцатого столетия. Яркая иллюстрация сказанных слов -- история с дробным квантовым эффектом Холла. Нобелевская премия вручена за открытие новой формы квантовой жидкости. Но, увы, эту квантовую жидкость нельзя ни пощупать, ни даже увидеть как, например, первую квантовую

жидкость -- жидкий гелий. Квантовая жидкость с дробно заряженными возбуждениями -- это всего лишь плод игры теоретиков с волновыми функциями. А поскольку теоретиков, жаждущих интересных игр много, то неминуемым образом у дробного квантового эффекта Холла возникла масса других объяснений, и таким образом картина физического явления оказывается неоднозначной, размытой и неуловимой. В результате возникает ситуация, немыслимая с точки зрения сознания, мыслящего в категориях немецкой классической философии. Не мысль вдыхает жизнь в ту или иную область физики, а наличие хорошей игрушки, которую дает в руки физиков только высокая технология. Квантовый эффект Холла -- ярчайшая иллюстрация этих слов. В первую очередь благодаря выдающимся технологическим достижениям были открыты и целочисленный, и дробный квантовый эффект Холла. Именно по этой причине не только экспериментальная, но даже теоретическая физика не могут сейчас существовать без этой технологии, как, скажем, бытовая электроника. Подобное положение рождает среди физиков своего рода комплекс неполноценности (кстати, это характерная черта постмодернизма) по отношению к классической и квантовой механике, так как, мало того, что современная физика является работой высокой технологии, она пока не смогла создать ни новой картины мироздания, ни достичь таких же практических результатов как ее предшественницы. С другой стороны комплекс неполноценности порождает приступы гордыни, когда физики начинают говорить либо о единой теории Всего, либо о новых захватывающих перспективах в электронике. В этом отношении очень характерна заметка о Нобелевской премии по физике в газете "Коммерсант", в которой квантовую жидкость наивно, с лукавой подачи физиков, "удовлетворяющих любопытство за государственный счет", пытаются "поженить" с микроэлектроникой. Не верьте, господа бизнесмены. Это всего лишь мистификация. Не будет никакой коммерческой выгоды от квантовой жидкости ни сейчас, ни даже в далеком будущем. Впрочем, мистификация - это также неременный атрибут постмодернистского действия. И квантовая жидкость с дробным зарядом -- это мистификация в жажде получить самую желанную награду -- Нобелевскую премию, которая в конце столетия приобрела в



среде мировой интеллектуальной элиты ранг единственного критерия общественной значимости того или иного научного результата. Что же остается современной физике, когда даже в ней -- царице точных наук -- нет истины ни в первой, ни в последней инстанции, когда критерием ее становится какая-то награда, пусть самая престижная в мире? У Николая Бердяева, видимо, первым понявшем, что двадцатый век окончательно похоронил истину, понимаемую как плод рационального, логического и интеллектуального действия, находим: "Решающее значение в познании играет эмоциональное приятие или отвержение, с трудом выразимое. Самый крайний интеллектуализм и рационализм может быть страстной эмоцией. Интуиция всегда не только интеллектуальна, но и эмоциональна. Мир не есть мысль как думают философы, посвятившие свою жизнь мысли. Мир есть страсть и страстная эмоция. В мире есть диалектика страстей. Охлаждение страсти рождает обыденность". Эти строки написаны более пятидесяти лет назад, когда догматическая идея торжества разума в полной мере владела всеми интеллектуалами мира и даже ужасы второй мировой войны не смогли поколебать скалозубовской уверенности в ней. Прозорливость гениального русского философа не может не восхищать. И все же, что отстает физике на исходе столетия? Остается все та же игра с электронами, фотонами и волновыми функциями, отражающая, как показывают истории с Нобелевскими премиями по физике последнего времени, бесконечную игру человеческих страстей, в которой ставка - жизнь.

З. КВОН,  
заведующий лабораторией ИФП СО РАН,  
доктор физико-математических наук.

г.Новосибирск.

