

# Корреляционные эффекты на языке экзотических частиц – вспомогательных бозонов и фермионов

П.А. Игошев, В.Ю. Ирхин

Несмотря на долгую историю квантовой теории твердого тела (в современном виде она существует около семидесяти лет), многие ее классические проблемы не решены, а для полученных решений не получено наглядной интерпретации и представления. Это делает наработанный богатый арсенал методов и решений недоступным широкому физическому сообществу, экспериментаторам, работающим в данной области, теоретикам другого профиля, а также просто обывателям, время от времени интересующимся современным состоянием физики твердого тела. В число таких проблем входят явления, связанные с физикой так называемых сильно коррелированных электронных состояний: переход металл-изолятор, формирование состояний тяжелых фермионов, спиновой жидкости, а также пространственно неоднородных состояний, возникающие в идеально однородном, то есть, на физическом языке, трансляционно инвариантном, твердом теле. Общим свойством этих явлений является нарушение традиционных и ставших стандартными физических представлений о твердом теле и его элементарных возбуждениях. В связи с этим разработка нового языка и адекватных новой ситуации представлений становится актуальной задачей не только физики, но и философии естествознания.

Для проблемы перехода металл-изолятор ситуация развивалась следующим образом. Стандартная одноэлектронная физика твердого тела в 30-40х годах XX века описывала транспортные явления и переход металл-изолятор следующим образом. Взаимодействие одного электрона с решеткой приводит к формированию так называемой полосы или зоны электронного спектра, что на физическом жаргоне формулируется как результат перескоков электрона с одного узла на другой, обеспечивающих проводимость. Если рассмотреть совокупность электронов в твердом теле, то в силу того, что они являются фермионами (а потому могут находиться в каждом состоянии только по одному — принцип Паули!), они последовательно занимают все доступные нижние энергетические состояния в полосе (зоне). Тогда отклик электронной системы на внешнее электрическое поле приведет к появлению электрического тока, если незанятые состояния существенно не отделены от занятых (энергии занятых состояний ограничены сверху уровнем Ферми). Так как количество полос над уровнем Ферми всегда является бесконечным, то для того, чтобы твердое тело было металлом/изолятором в рамках одноэлектронной теории, необходимо и достаточно отсутствие/наличие щели в электронном спектре между свободными и занятыми состояниями на уровне Ферми. Последнее условие представляет собой известный критерий Вильсона, определяющий транспортные свойства твердого тела.

Однако оказалось, что критерий Вильсона не объясняет изоляторное состояние для тех материалов, в которых электронный спектр, определенный взаимодействием с решеткой, не имеет щели в спектре, но экспериментально система демонстрирует отсутствие заметной проводимости. Дальнейшее продвижение в понимании было достигнуто Н. Моттом, который показал, что изоляторное состояние может быть вызвано принципиально новыми корреляционными эффектами, связанными с тем, что два разделенных по узлам электрона и два электрона с разными направлениями собственного магнитного момента (спина), занимающих один узел, могут вести себя совершенно различным образом. Хотя по отношению к энергии двухэлектронных состояний сам по себе этот факт достаточно очевиден, Мотт впервые показал, что такое различие может проявиться прежде всего в транспортных свойствах. Переход металл-изолятор, имеющий корреляционную природу, был впоследствии назван моттовским переходом [1].

Дальнейшее развитие представлений о переходе металл-изолятор было связано с именем Дж. Хаббарда, предложившим одноименную модель, учитывающую и электронный перенос, и внутриузельное взаимодействие электронов, а также первые приближения, позволяющие «решить» эту модель. Несмотря на то, что результаты Хаббарда имели глубокий смысл, они не могли описать переход металл-изолятор — первое решение Хаббард-I [2] всегда было изоляторным, то есть «корреляционные» тенденции были переоценены, а последующие решения были чрезмерно сложными и даже внутренне противоречивыми (на языке теоретиков, функции Грина для решений не имели правильных аналитических свойств). Таким образом, долгие годы после формулировки идей Мотта и Хаббарда, несмотря на то, что качественно, на уровне интуитивных образов, существование перехода и его причина были осознаны, подходящего подхода и языка не было предложено. Дальнейшее продвижение связано с именами Андерсона, Гутцвиллера [3], Котляра и Рукенштайна (метод вспомогательных бозонов [4]) с одной стороны и Хирша, Джоржеса, Метцнера, Вольхардта — с другой (так называемая теория динамического среднего поля [5]).

Коулмен [6], Андерсон [7], Котляр и Рукенштайн [4] предложили реализовать идею дополнительного языка для описания многоэлектронных состояний буквально: для каждого узла решетки для каждого многоэлектронного состояния «руками» вводился «вспомогательный» (slave) бозон. В простейшем случае, если на одном узле есть одно орбитальное электронное состояние, то тогда многоэлектронных состояний, а значит и бозонов, будет  $2^2 = 4$  штук (двойка – за счет спиновой степени свободы):  $e$ -бозон (*голон*) описывает свободный от электронов узел,  $d$ -бозон (*дублон*) – занятый двумя электронами с противоположными спинами узел, и два спин-зависающих бозона,  $p$ -бозона, – однократно занятый электроном (с соответствующим спином) узел.

Формализм функционального интегрирования и его реализация в квантовой теории поля позволяет создавать частицы простым росчерком пера – независимо от того, «реальны» они или просто удобны, лишь бы

они давали адекватное описание реальности. Более того, само понятие «реальности» частицы становится в этом контексте достаточно условным. В описании электронной системы по Котляру и Рукенштайну движение электронов по решетке должно сопровождаться сопутствующим движением бозонов так, чтобы описание на обоих языках было полностью соответствующим другу. Заметим, что заменить одно описание другим невозможно, так как одни частицы являются бозонами, а другие — фермионами (можно лишь дополнить описанием ферми-системы бозонным описанием). С технической точки зрения бозоны имеют ряд преимуществ перед фермионами [8]:

1) бозоны не взаимодействуют между собой как электроны (кулоновское взаимодействие), вместо этого *дублон* сам в себе содержит энергию кулоновского взаимодействия, полностью абсорбируя ее, а все остальные бозоны не содержат никакой локальной (узельной) энергии вообще. Вся остальная энергия бозонов является, в сущности, их кинетической энергией.

2) Бозоны проще описываются на языке функционального интеграла, в частности для них не существует так называемой проблемы знака, крайне затрудняющей вычисления статистических средних при низких температурах.

3) Бозонный аналог в классическом мире — это просто число, и эти числа легко получаются в классическом пределе (то есть на функциональном языке — заменой оператора числовым полем) постоянной Планка стремящейся к нулю, а полевой аналог фермиона — так называемые грасмановы (антикоммутирующие) числа, вообще не получающиеся как самостоятельное явление в результате предельного перехода к нулевой постоянной Планка. Фермионы участвуют во взаимодействиях всегда парами, а пара фермионов статистически подобна бозону.

4) Бозоны испытывают бозе-конденсацию, которая может быть реализована и в твердом теле для фононов, магнонов и вспомогательных бозонов как конденсация в импульсном пространстве.

Таким образом, введение вспомогательных бозонов позволяет если не решить, то существенно упростить понимание сложных квантовых состояний. Например, такие сложные квантовополевые концепции теории твердого тела, как квазичастичный вычет в теории ферми-жидкости и некогерентные вклады в функцию Грина, прямо связаны с наличием бозе-конденсата дублонов и вклада в динамику физического электрона от движения бозонов. Однажды появившись, вспомогательные бозоны начинают «жить своей жизнью», двигаясь отдельно от электронов, и связаны с ними лишь математическими условиями-ограничениями. В этой раздельной динамике проявляется деконфайнмент; этот английский термин происходит из теории сильно взаимодействующих элементарных частиц (например, кварков) и вряд ли может быть удачно переведен на русский язык без искажений, означая в нашем случае распад физического электрона на незаряженный фермион со спином (спинон) и квантовую суперпозицию заряженного дублона (*d*-бозона) и *p*-бозона. Таким образом, переход металл-изолятор в парамагнитной фазе может быть, описан через разрушение дублонного конденсата. Первые подходы, предложенные самими Котляром и Рукенштайном, пренебрегали всякой динамикой бозонов, представляя их только как конденсат (то есть описывались несколькими вещественными числами), что обеспечивало очень грубое описание физических свойств. Однако и на этом пути были достигнуты некоторые успехи, что указывает на чрезвычайную потенциальную плодотворность такого подхода.

Экзотическое описание на языке нейтральных фермионов и бесспиновых заряженных бозонов подходит для спиновой жидкости. Напротив, в случае магнитоупорядоченных фаз можно ввести так называемые швингеровские бозоны, несущие спин, и бесспиновые заряженные фермионы, причем магнитный порядок описывается как конденсация этих бозонов (в векторном варианте формализма Котляра-Рукенштайна — *z*-компоненты *p*-бозона). Таким образом, при фазовых переходах между магнитными состояниями и спиновой жидкостью происходит смена (трансмутация) статистики элементарных возбудений.

Второе направление в описании сильнокоррелированных систем, основанное на динамической теории среднего поля, также продемонстрировало ряд значительных успехов, в частности был, пожалуй впервые, достаточно последовательно описан переход металл-изолятор. Хотя этот подход удобен в первопринципных численных расчетах, ему не хватает наглядности. Это несколько снижает его плодотворность и может ограничить исследователя в отношении создания новых концепций самых сложных явлений в физике твердого тела, для которых удобны аналитические методы.

#### Литература.

1. Н.Ф. Мотт. Переходы металл-изолятор. - М., Наука, 342 с. (1979).
2. J. Hubbard, Proc. Roy. Soc. (London) **A276**, 238 (1963).
3. M. Gutzwiller, Phys. Rev. Lett. **10**, 159 (1963); Phys. Rev. **137**, A1726 (1965).
4. G. Kotliar, A. Ruckenstein, Phys. Rev. Lett. **57**, 1362 (1986).
5. A. Georges, G. Kotliar, W. Krauth, M. J. Rozenberg, Rev. Mod. Phys. **68**, 13 (1996).
6. P. Coleman, Phys. Rev. B **29**, 3035 (1984).
7. P. W. Anderson, Science **235**, 1196 (1987).