

Московский физико-технический институт
Кафедра общей физики

Вводные замечания к курсу
«Основы современной физики: Квантовая макрофизика».

В.Н.Глазков

Москва

2021

Предметом курса физики 6 семестра является квантовая макрофизика — квантовые явления в многочастичных системах. В основном речь пойдёт о явлениях, относящихся к области физики, называемой физикой конденсированного состояния или физикой твёрдого тела.¹ Цель этой небольшой вводной заметки — показать, что интересного есть в этой области физики, какие концепции объединяют изучаемые явления, и почему это интересно.

Действительно, может представляться, что «квест» по поиску новых фундаментальных законов физики лежит либо в космологической области, либо в области физики элементарных (всё более и более элементарных) частиц. А после этого можно сказать, как приписывается Дираку, «всё остальное — химия».²

Однако природа оказывается устроена интереснее и при объединении большого количества элементарных частиц вместе возникают явления, которые не сводятся к свойствам составляющих частиц. По знаменитым словам П.В.Андерсона³: «More Is Different». Аргументы Андерсона изложены в статье в Science [1] в сжатой, яркой и наглядной форме, и их пересказ отнимет у слушателя эстетическое удовольствие от знакомства с этой работой. За 45 лет, прошедших с момента этой публикации эти аргументы не устарели. Приведём лишь один из них: ряд естественных наук может быть условно выстроен в лестницу «атомная и ядерная физика — физика конденсированного состояния — химия — биология — ...». В этой последовательности предмет «предыдущей науки» является «элементарной частицей» для последующей. Но при этом на каждой новой «ступени» возникают новые качественные закономерности.

Физика конденсированного состояния является первой из «не элементарных» наук в этой последовательности. Поэтому изучение открывающихся новых закономерностей в этой (иногда) ещё простой науке имеет и в каком-то смысле общефилософскую ценность, как пример возникновения новых явлений в системах простых и понятных частиц. И этот пример позволяет в чём-то лучше понимать и формирование наук на следующих ступеньках этой лестницы.

О каких же явлениях пойдёт речь? Во-первых, это основные состояния систем многих частиц. При взаимодействии макроскопически большого числа частиц часто возникает так называемое спонтанное нарушение симметрии: возникают разного рода упорядоченные состояния. Этими упорядоченными состояниями являются и привычные формы кристаллического порядка в твёрдых телах, и менее привычные нам виды магнитного упорядочения в кристаллах, и совсем экзотические формы нарушения симметрии системы многих тел типа сверхтекучести или сверхпроводимости.

Во-вторых, это вопросы термодинамики систем многих тел. Как только найдено основное состояние системы, соответствующее её устройству при $T=0$, возникает вопрос о поведении системы при $T \neq 0$. При этом, если основное состояние характеризуется спонтанно нарушенной симметрией, это нарушение симметрии будет исчезать с ростом температуры — что соответствует различного рода фазовым переходам между состояниями.

Кроме того, оказывается, что при не слишком высоких температурах отклонение состояния сложной системы макроскопически большого количества взаимодействующих частиц от основного можно описывать на достаточно универсальном языке квазичастиц — элементарных возбуждений, распространяющихся над «вакуумом» основного состояния. Разнообразие спектральных свойств возбуждений в различных системах и возможность контролировать параметры этих спектров внешними воздействиями или подбором материала позволяет изучать разнообразные квазичастицы иногда формально аналогичные (а иногда, наоборот, не имеющие аналогов) «нормальным» частицам физики элементарных частиц.

1 В англоязычной терминологии "condensed matter physics"

2 "the rest is chemistry" в англоязычной литературе

3 П.В. Андерсон (P.W.Anderson) — нобелевский лауреат по физике 1977 года

Наконец, ещё одной интересной возможностью физики конденсированного состояния является возможность получать системы с пространственной размерностью меньше трёх: двумерные и одномерные системы. Такая возможность для «обычных» частиц отсутствует в принципе, что часто заставляло нас в курсе атомной и ядерной физики ограничиваться приближёнными результатами одномерной модели для оценки какого-то эффекта. В физике конденсированного состояния двумерные и одномерные системы — это реальность, доступная не только теоретику, но и экспериментатору.

При этом физика остаётся единой наукой — методы и идеи, развивающиеся сначала в физике твёрдого тела начинают использоваться в физике элементарных частиц или космологии, или, наоборот, теоретико-полевые подходы активно применяются при описании различных явлений в физике конденсированного состояния. Концепция спонтанного нарушения симметрии возникла изначально как часть теории Ландау фазовых переходов второго рода, а позднее стала использоваться для описания разделения фундаментальных взаимодействий на ранних этапах развития Вселенной или для описания хиггсовского взаимодействия.⁴ Среди квазичастиц, описывающих свойства некоторых твердотельных систем, есть такие (см., например, [3]), взаимодействие между которыми растёт с увеличением расстояния между ними — в полной аналогии с взаимодействием (конфайнментом) кварков в мире элементарных частиц.

В чём-то физика твёрдого тела оказывается даже богаче на возможности, чем мир элементарных частиц. Цитируя ту же статью В.А.Рубакова [2]: «Самое удивительное <...>: механизм Энглера-Браута-Хиггса — отнюдь не единственный возможный механизм нарушения симметрии в физике микромира и генерации масс элементарных частиц, <...>. Этому нас учит в частности физика конденсированных сред. В ней имеется множество примеров спонтанного нарушения симметрии и разнообразие механизмов этого нарушения. И в большинстве случаев ничего похожего на бозон Хиггса в этих примерах нет». За один из примеров такого необычного нарушения симметрии (топологический порядок в одномерных и двумерных системах) была присуждена Нобелевская премия по физике 2016 года. При этом среди квазичастиц физики твёрдого тела присутствует, например, магнитный монополю, реализующийся в так называемом «спиновом льде» [4].

Помимо этого единства теоретических методов и представлений, не менее важным является и взаимопроникновение экспериментальных методов. Работа многих приборов, детекторов излучений основана на явлениях физики конденсированного состояния (не говоря о том, что вся наша полупроводниковая электроника работает на принципах физики твёрдого тела). Сверхпроводящие магниты используются и в медицинских томографах, и в ускорителях частиц. Квантовый эффект Холла и эффект Джозефсона служат основой для некоторых метрологических стандартов. И в то же время методы и технологии других разделов физики становятся инструментом физики конденсированного состояния: ускорители предыдущих поколений перепрофилируются в источники синхротронного излучения, мюонные пучки используются как инструмент зондирования кристаллов, исследовательские реакторы дают интенсивные потоки нейтронов, применяемых для изучения структуры кристаллов и спектров элементарных возбуждений.

Наконец, нельзя не отметить важную роль физики твёрдого тела в современных технологиях. Миниатюризация полупроводниковых элементов приближается к фундаментальным ограничениям и необходимости учитывать квантовые эффекты. Квантовый эффект Холла, необычное и очень хорошо воспроизводимое квантование холловского сопротивления в двумерном электроном газе в полупроводниковых структурах, стал метрологическим

⁴ В статье [2], посвященной открытию бозона Хиггса, акад. В.А.Рубаков пишет: «Эффективная теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау чрезвычайно похожа на теорию Энглера-Браута-Хиггса (точнее, наоборот: теория Гинзбурга-Ландау на 14 лет старше)».

стандартом сопротивления [5]. Эффект Джозефсона, туннелирование сверхпроводящих носителей заряда между двумя сверхпроводниками, позволил создать стандарт напряжения [6]. В развитии квантовых вычислений кубиты реализуются на объектах, связанных с физикой твёрдого тела, например в структурах с джозефсоновскими туннельными контактами [7].

Таким образом, физика конденсированных сред продолжает оставаться динамично развивающейся, современной областью физики и изучение этого раздела физики логично завершает цикл курса общей физики МФТИ.

Структура курса примерно следующая: сначала мы познакомимся со свойствами кристаллов (это необходимо для ознакомления с языком и некоторыми методическими особенностями физики конденсированного состояния), далее рассмотрим особенности движения частиц в кристалле, с которыми связаны металлические или полупроводниковые свойства материала, а после этого рассмотрим несколько актуальных вопросов современной физики конденсированного состояния — низкоразмерные системы, сверхпроводимость, магнитные свойства многочастичных систем.

Чтение курса начато в 2014-2015 учебном году. Курс подготовлен авторским коллективом в составе: В.Н.Глазков (ИФП им. П.Л.Капицы РАН), Э.В.Девятков (ИФТТ РАН), Я.В.Фоминов (ИТФ им. Л.Д.Ландау РАН), А.Ю.Кунцевич (ФИАН им. П.Л.Лебедева). Авторы признательны М.В.Фейгельману (ИТФ им. Ландау РАН) и Д.А.Александрову (МФТИ) за инициацию этого проекта, деканату ФОПФ, а позднее — руководству Физтех-школы ЛФИ, и руководству кафедры общей физики МФТИ за постоянный интерес, поддержку и помощь в решении организационных вопросов. Авторы благодарят всех преподавателей кафедры общей физики МФТИ, участвовавших в обсуждении и реализации курса за их интерес и многочисленные полезные критические замечания. Подготовка курса в 2014-2015 году была частично поддержана в рамках программы «5 топ 100» и поддержана фондом «Физика» (physicsfoundation.org).

По вопросам замеченных неточностей, опечаток, ошибок и уточнения каких-то деталей можно обращаться к В.Н.Глазкову vglazkov@yandex.ru. В курсе планируется 13 учебных лекций, по всем лекциям будут доступны электронные конспекты и презентации (на сайте кафедры общей физики МФТИ и на странице В.Н.Глазкова www.kapitza.ras.ru/people/glazkov), по некоторым темам курса составителями подготовлены дополнительные методические пособия, доступные на сайте кафедры и веб-странице автора.

Библиография

- 1: P.W.Anderson, *More Is Different*, Science, 177, 393 (1972)
- 2: В.А.Рубаков, *К открытию на Большом адронном коллайдере частицы со свойствами бозона Хиггса*, УФН, 182, 1017 (2012)
- 3: Bella Lake, Alexei M. Tsvelik, Susanne Notbohm, D. Alan Tennant, Toby G. Perring, Manfred Reehuis, Chinnathambi Sekar, Gernot Krabbes and Bernd Büchner, *Confinement of fractional quantum number particles in a condensed-matter system*, Nature Physics, 6, 50 (2010)
- 4: C. Castelnovo, R. Moessner and S. L. Sondhi, *Magnetic monopoles in spin ice*, Nature, 451, 42 (2008)
- 5: NIST Team, Metrology of the Ohm, 2022, <https://www.nist.gov/programs-projects/metrology-ohm>
- 6: Johannes Kohlmann and Ralf Behr, Development of Josephson voltage standards, 2011, <https://www.intechopen.com/chapters/16237>
- 7: Kockum A.F., Nori F., Springer Series in Materials Science, vol 286. : Quantum Bits with Josephson Junctions. In: Tafuri F. (eds) Fundamentals and Frontiers of the Josephson Effect., 2019

