

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра общей ядерной физики

РЕФЕРАТ
по дисциплине
«Английский язык»
на тему
«ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И КОНТРОЛЬ
КВАНТОВЫХ СИСТЕМ»

Студента 113М группы
Гусейнова А-К. Д.

Научный руководитель
канд. физ.-мат. наук Горелов И. В.

Преподаватель
ст. преп. Назарова Е. Н.

Москва — 2021

Содержание

1	Введение	3
2	Коэффициент преломления сред	4
3	Наименьшее время перемещения квантовой системы	7
4	Свойства основного состояния водородной цепи	10
5	Заключение	13
	Глоссарий	15
	Список литературы	19

1 Введение

Фундаментальные аспекты квантовой физики были развиты и сформулированы в начале XX века, когда классические подходы не смогли описать некоторые явления, включающие спектр теплового излучения абсолютно черного тела, испускание фотоэлектронов и комптоновское рассеяние. Классическая физика также не могла объяснить спектры некоторых атомов во внешнем магнитном поле, но эта проблема не выглядела настолько критичной, и ученые надеялись найти решение в рамках классической теории.

Квантовая механика заставила человечество посмотреть на микромир совершенно по-другому. Она показала сложность применения понятий, которыми мы с легкостью оперируем в повседневной жизни и в классической физике, к системам маленьких размеров. Было обнаружено множество явлений, совершенно не согласующихся со старыми представлениями. Оказалось, что свет одновременно со всеми характеристиками волны при более внимательном изучении обладает всеми характеристиками частицы. То же самое относится и к объектам, изначально считавшимся частицами, таким как электроны, протоны и даже большие молекулы. Этот эффект называют корпускулярно-волновым дуализмом, и он хорошо иллюстрирует, насколько велико различие между квантовой и классической физикой.

Изучение квантовых систем уже привело к созданию уникальных методов и технологий, повсеместно используемых в повседневной жизни каждого человека на Земле. При этом темп развития совершенно не замедляется. Перед учеными встают все новые и новые вопросы по мере нахождения объяснений для старых. Основной проблемой современных работ в области квантовой физики является сложность любых разумных вычислений. Математики и физики пытаются найти решение проблемы, прибегая к принципиально новому способу вычислений, использующему квантовые системы в своей сути. Но на данный момент каждая задача и каждый вопрос требует практически диаметрально противоположного подхода. В упоминаемых в реферате работах эта особенность квантового мира особенно заметна.

2 Коэффициент преломления сред

Прозрачные материалы по-разному пропускают видимый свет. Их разнообразные свойства включают прозрачность, коэффициент отражения, закон дисперсии и коэффициент преломления. Большинство из них обусловлены оптическим откликом вещества, который представляет собой фундаментальную характеристику, определяемую атомной структурой. Несмотря на то, что оптический отклик одиночного атома довольно просто вычислить, любые попытки вывести из него показатель преломления атомного вещества приводили к нереалистичным результатам. В этой статье приводится принципиально новый подход к вычислению оптического отклика и показателя преломления атомного вещества и проливается свет на загадку, почему величины показателей преломления всегда порядка единицы.

Чтобы понять проблему, нужно сначала проследовать за традиционным подходом и обнаружить его слабости. Для избежания самых сложных и требующих наибольшее компьютерное время вычислений атомы приближаются полуклассическими двухуровневыми системами. Это сравнительно близко к правде и охватывает наиболее важные характеристики атома. Отклик одиночного атома хорошо известен, так что наша задача лишь в том, чтобы применить его каким-либо образом к системе многих атомов. Традиционный путь заключается в том, чтобы забыть о дискретной, зернистой атомной структуре вещества, ввести его коллективные характеристики, такие как плотность, поляризуемость и так далее, и оперировать с точки зрения непрерывной среды. На этом этапе читатель уже, возможно, выявил наибольшую слабость данного подхода, но, тем не менее, стоит довести логическую цепочку до результата. Одной из отличительных особенностей сплошной среды оказывается то, что электрическое поле, распространяющееся в ней, постоянно и непрерывно находится под ее влиянием и таким образом оставляет невозможным множественное рассеяние и интерференцию. Это приводит к тому, что коэффициент преломления в лидирующем порядке представляет собой лишь коэффициент преломления единичного атома, масштабированный множите-

лем, пропорциональным квадратному корню числа атомов, разделенного на объем. Таким образом, в резонансе коэффициент преломления бесконечно растет с увеличением плотности, что, очевидно, не наблюдается в эксперименте.

Подход, предложенный в статье [1], однако, не пренебрегает атомной природой любого вещества. Он осуществляется для ансамбля абсолютно одинаковых атомов, каждый из которых имеет одну и ту же резонансную частоту, но остается отдельной точечной частицей. Основной причиной рассмотрения приближения непрерывного вещества во всех предшествовавших теоретических работах является то, что оно колоссально упрощает все формулы и даже позволяет достичь результата аналитически. При сохранении атомной структуры приходится вычислять множество больших сумм по всем атомам, при этом зная величины электрического поля в точках положения каждого атома. Еще сильнее усложняет задачу то, что в правильном, то есть квантовом, подходе необходимо принять во внимание смешивание состояний атомов, обусловленное принципом Паули, и оно добавляет определитель размера $N \times N$ в каждое уравнение, экспоненциально увеличивая затрачиваемое на вычисления время в случае больших систем. Для значений N даже порядка 10^3 на вычисления требуется колоссальное время. Тот факт, что в рассматриваемой задаче атомы представляются простыми системами с лишь двумя энергетическими уровнями, безусловно, упрощает работу, но недостаточно для полноценного масштабного анализа. Однако, авторы также предлагают довольно элегантный способ избавиться от такой сложности. Вскоре он будет описан, но для начала нужно понять, как ведут себя два атома при попадании на них электромагнитного излучения.

Если два абсолютно идентичных атома с резонансной частотой ω_0 взаимодействуют друг с другом, их оптический отклик не окажется функцией Лоренца с центром на частоте ω_0 и высотой вдвое больше, чем для одного атома. Вместо этого, отклик представляет собой два значительно удаленных друг от друга лоренцевых пика обычной высоты с центрами на смещенных частотах $\omega_0 + \delta\omega$ и $\omega_0 - \delta\omega$, где $\delta\omega$ зависит от расстояния между атомами

и силы взаимодействия между ними. Основываясь на оптическом отклике, который определяет реакцию системы на падающий видимый свет, два идентичных атома ведут себя почти как два атома, чьи резонансные частоты слегка смещаются по сравнению с изначальной частотой атомов.

Таким образом, можно ожидать, что набор идентичных атомов может быть представлен в виде набора разных атомов с эффективными резонансными частотами, зависящими от параметров пространственного распределения исходной системы. В самом деле, авторы сравнивают приведенное упрощение с прямым вычислением упомянутых выше объемных формул для малых плотностей и получают хорошее согласие между ними. Кроме того, сравнение показывает, что показатель преломления атомного вещества достигает предельного значения по мере увеличения плотности. Для больших плотностей возможно применение только упрощенного метода, но он подтверждает, что показатель преломления испытывает насыщение и достигает величины порядка 1.7, которая, очевидно, порядка единицы.

Результат анализа объясняет универсальное правило, что показатель преломления любого наперед заданного вещества всегда имеет порядок единицы. Это обусловлено зернистостью и атомной структурой всего во Вселенной.

3 Наименьшее время перемещения квантовой системы

С самого зарождения квантовой физики в начале XX века было открыто множество интересных, интригующих, необычных и странных явлений. Некоторые из них оказались весьма полезными в приложениях. Сегодня, целью многочисленных современных физических экспериментов служит регулировка и контроль квантовых систем для полноценного использования всех их свойств. Одной из таких целей является транспортировка квантовой системы в пространстве. Разумеется, критически важно осуществлять перенос когерентно, иначе состояние оказывается искаженным, а задача транспортировки на этом провалена. Итак, должен существовать какой-то естественный предел на длительность когерентной транспортировки. Эта тема уже давно описана для простейших двухуровневых систем, но они редко появляются, и люди в основном работают с более сложными системами. Можно было бы ожидать, что результаты для сложных систем будут представлять собой какую-либо модификацию более простых результатов, но эксперименты свидетельствуют о существенной разнице. Таким образом, интересно как понять, откуда идет эта разница, так и найти осмысленный нижний предел этой длительности. В дополнение к этому было бы также интересно сравнить результаты с классической физикой.

Задача оптимизации пути объекта с целью достижения минимального времени была впервые поставлена Бернулли для массивного объекта, падающего под действием однородного гравитационного поля. Решение хорошо известно и называется брахистохроной, что с греческого переводится как “кратчайшее время”. Эту задачу можно обобщить до нахождения наименьшего времени, за которое физическая система может быть изменена из ее начального состояния до определенного желаемого состояния. Наименьшее время в таком случае зависит от доступного количества энергии и типа управления.

В квантовой физике такой предел скорости был выведен Мандельштамом и Таммом [2] и напоминает принцип неопределенности Гейзенберга $\tau_{MT} =$

$\frac{\pi\hbar}{2\Delta E}$. Он показывает, что длительность перемещения не может стремиться к нулю, если нет доступа к неограниченным запасам энергии. Этот предел был экспериментально подтвержден для двухуровневых систем, однако для сложных систем реальный предел оказывается существенно больше, и существующий теряет свой смысл. Проблема здесь в том, что двухуровневой системе желаемого состояния можно достичь одной осцилляцией Раби, которая оказывается фундаментально неприменимой для непрерывного набора состояний, как в случае пространственного положения.

В работе [3] конвейерная лента, основанная на оптической решетке используется для транспортировки атомного волнового пакета на расстояние примерно в 15 раз больше его размера. Потенциал ловушки настраивается таким образом, чтобы глубина была достаточной для подавления квантового туннелирования и чтобы траектория переносимой системы была оптимальной. Оптимальная траектория определяется на основе численного моделирования.

Точность транспортировки представляет собой пересечение между фактическим и целевым конечными состояниями, со значением 1 отвечающим идеальному результату, и определяется как функция длительности. Было найдено, что точность испытывает насыщение для длительностей больше, чем период квазигармонических осцилляций потенциала ловушки (этот же период также ответственен за неопределенность энергии в транспортируемой системе). Чтобы убедиться, что транспортировка осуществляется когерентно, авторы готовят конкретную суперпозицию в качестве начального состояния, затем транспортируют часть ее в целевое состояние и обратно, а затем извлекают постоянную интерференцию. Было найдено, что постоянная интерференция в точности совпадает с чистотой, измеренной ранее, что доказывает сохранение когерентности при использовании данного метода.

Такие же измерения и симуляции были осуществлены для нескольких потенциалов ловушки с разными глубинами, и было показано, что минимальное время обратно пропорционально глубине. Также интересен тот факт, что классический и квантовый случаи различаются только на 25%, а значит, пре-

дел длительности по большей части обусловлен Гильбертовой метрикой квантовых состояний.

4 Свойства основного состояния водородной цепи

С точки зрения электрической проводимости существует три типа материалов: диэлектрики, полупроводники и проводники (также называемые металлами). Среди них трех наиболее интересными и сложными, конечно же, являются полупроводники, однако даже два других типа далеко не полностью поняты и описаны. Известно, что у диэлектриков электронная плотность локализована вблизи атомов или внутри молекул. Касательно металлов известно, что они формируют уникальную решеточную структуру положительно заряженных ионов и практически свободно движущихся между ними электронов, которые даже можно считать газом. Для более исчерпывающего описания природы электрической проводимости необходимо симулировать всю атомную систему целиком и вывести условия, при которых она ведет себя как металл или как диэлектрик. Самая сложная часть этой задачи в вычислениях самих по себе. Квантовые системы, очевидно, включающие в себя атомные вещества, должны соответствовать определенным симметриям волновой функции, и чем больше в системе электронов, тем сложнее эти ограничения, а значит и вычисления. Сложность возрастает экспоненциально с размером системы. Квантовые компьютеры могут значительно упростить вычисления такого рода, но на данный момент для работы остаются лишь малые системы.

В статье [4] авторы работают с системой N идентичных атомов водорода, размещенных вдоль оси z на одинаковом расстоянии. Для еще большего упрощения системы, протоны считаются неподвижными, так что задача представляет собой лишь движение N электронов в определенном потенциале. Целью является анализ того, как электроны ведут себя в случае различных расстояний между протонами и различных значениях N числа атомов. Даже при таком сильном упрощении обыкновенные прямолинейные подходы не предоставляют каких-либо разумных результатов, поэтому авторы использовали несколько численных методов и пытались выявить согласующиеся результа-

ты.

Авторы начали с больших расстояний между протонами. В этом случае каждый электрон локализован вблизи соответствующего протона, а их энергетические уровни практически совпадают с уровнями изолированных атомов. Однако, интересный эффект наблюдается все равно. Хотя энергетические уровни и почти совпадают, электроны, являясь частями одной единой квантовой системы, ощущают друг друга из-за симметрий волновой функции. Таким образом, при больших расстояниях когда кулоновское взаимодействие между электронами мало, они располагают свои спины в противоположных направлениях. В результате цепочка атомов водорода проявляет антиферромагнитные корреляции, которые затухают слегка быстрее по сравнению с простейшими соображениями, что может быть обусловлено конечным размером цепочки.

По мере приближения протонов, они начинают формировать пары, называемые димерами. Наиболее очевидное следствие димеризации в том, что электронная плотность между протоном и его соседом справа отличается от плотности между ним и соседом слева. Это очень тонкий эффект, и его сложно уловить численно, но три из пяти принципиально различающихся метода, использованных авторами, дали приблизительно одинаковые результаты для разности электронной плотности в зависимости от длины водородной цепи, что, безусловно, впечатляет. Другие свидетельства димеризации содержатся в кинетической энергии электронов и энтропии спутывания.

Для малых расстояний между протонами наиболее интересным для изучения явлением представляется переход от диэлектрика к проводнику. Согласно некоторым из наиболее успешных феноменологических моделей трехмерных проводников, в исследуемой системе не должно быть такого перехода вообще. Однако, он происходит по двум причинам. Во-первых, уровни энергии одиночных атомов уширяются в присутствии других атомов. Чем ближе они располагаются, тем шире становятся уровни. А значит, должен быть момент, когда наивысший занятый уровень перекрывается с самым низшим свободным, и электронам уже не нужна большая энергия, чтобы перемещаться по цепи.

Вторая причина несколько более техническая. Квазиволновой вектор, порожденный периодической структурой, приобретает второе возможное значение, вызванное механизмом самодопинга, вблизи нуля. Это позволяет электронам диффундировать вдоль оси цепочки и, таким образом, проводить электричество. Необходимо отметить, что в этом случае меньшее количество методов дали согласующиеся результаты, но эта задача в целом более сложна, так что согласие считается удовлетворительным.

5 Заключение

Большой интерес представляют явления, происходящие на стыке дисциплин. Коэффициент преломления с точки зрения микромира обусловлен законами квантовой механики, волновыми функциями и очень тонкими характеристиками межатомных взаимодействий. Атомы в этом случае являются сложными квантовыми системами, отклик которых на электромагнитное излучение в видимом диапазоне длин волн довольно причудливо. С другой стороны, коэффициент преломления, являясь внутренней характеристикой среды, описывает поведение света при прохождении через нее. На протяжении долгого времени не удавалось связать эти две стороны показателя преломления. Но новый подход к вычислениям, предложенный авторами статьи, позволяет работать с большими количествами частиц, очевидно, более подходящими для описания реальных систем, которые состоят из порядка 10^{23} атомов. Важнейшим результатом их анализа является достижение среды с показателем преломления разумной величины даже для большой плотности вещества.

Управление квантовыми системами без затрагивания классической стороны также представляет большой интерес. При обращении с квантовыми системами поддержание чистоты квантового состояния – одна из самых сложных задач. Особенно сложно это осуществить в случае непрерывного набора состояний, как для пространственного положения волнового пакета. Таким образом, оказывается проблематично перемещать квантовую систему в пространстве. С точки зрения фундаментальной физики, интересно найти минимальный предел времени транспортировки квантовой системы с сохранением когерентности. Авторы статьи назвали эту задачу квантовой брахистохронной по аналогии с подобной задачей, поставленной Бернулли. Авторы путем моделирования выявили оптимальную траекторию, по которой должен двигаться волновой пакет, чтобы сохранить чистоту состояния. При движении по этой траектории искажение волнового пакета экспоненциально убывает при достижении определенного предела. Таким образом, этот предел и явля-

ется наименьшим временем, требуемым для когерентного пространственного переноса квантовой системы.

Очередной системой, находящейся на стыке областей физики, является твердое тело. С одной стороны, твердое тело – это просто набор атомов, находящихся под влиянием друг друга так, что они формируют равномерную структуру. Все свойства твердого тела происходят от взаимодействия между электронами разных атомов, которые объединены в одну систему. Наличие общей системы приводит к множеству интересных корреляционных эффектов, включая антиферромагнетизм, магнетизм вообще и электрическую проводимость. Касательно проводимости хорошо разработанные теории в состоянии лишь в общих чертах обосновать свободу движения электронов и как она появляется при переходе от диэлектрического состояния к металлическому. Авторы получают общую картину такого перехода и объясняют на уровне одномерных систем, каким образом электроны приобретают возможность беспрепятственно двигаться вдоль цепочки атомов водорода. Это представление позволяет по-новому взглянуть явление проводимости в металлах.

Глоссарий

advent	– пришествие
antiferromagnetic	– антиферромагнитный
to approximate	– приблизить
atomic medium	– атомная среда (состоящая из атомов)
attenuation	– затухание
axis	– ось
bond	– связь
brachistochrone	– брахистохрона
bulk	– большой, крупный
coherent	– когерентный
commensurate	– соизмеримый, соразмерный
conductivity	– проводимость
to confine	– ограничивать
conjecture	– предположение
consistent (results)	– согласующиеся (результаты)
continuous medium	– непрерывная среда
continuous states	– непрерывный набор состояний
conundrum	– загадка, парадокс
conveyor belt	– конвейерная лента
to corroborate	– подтверждать
Coulomb interaction	– кулоновское взаимодействие
crest	– гребень, вершина
cusp	– пик, острие
to decompose	– раскладывать
degeneracy	– вырождение
density	– плотность
diametrically opposite	– диаметрально противоположный
diffuse	– расплывчатый, размытый
to diffuse	– диффундировать

dilute gas – разреженный газ
dimer – димер
discrete – дискретный
dispersion law – закон дисперсии
distorted – искаженный
dyadic – состоящий из двух частей
electron density – электронная плотность
to encode – представлять
ensemble – ансамбль
entanglement – спутанность
entropy – энтропия
envelope – огибающая
equidistantly – эквидистантно
evidence – свидетельство
to exhibit – проявлять
exquisitely – изящно
to fade – затухать
finite – ограниченный
to foster – стимулировать
fundamentally – принципиально
to generalize – обобщить
granularity – зернистость, дискретность
to grow indefinitely – неограниченно расти
hallmark – отличительная черта
hatched – заштрихованный
(it's) illuminating – хорошая иллюстрация
implication – следствие
in silico – путем моделирования
incident – падающий (свет)
inset – вставка

to instantiate – приводить в пример
insulator – диэлектрик
interrogation – извлечение данных
intertwined – переплетенные
intricate – сложный, запутанный
kinetic energy – кинетическая энергия
kink – излом
large-scale – масштабный
lattice – решетка
leading order – ведущий порядок (в теории возмущений)
localized – локализованный
Lorentzian – функция Лоренца
metric – метрика
to necessitate – требовать
numerical simulation – численное моделирование
opacity – непрозрачность
optical response – оптический отклик
oscillation – колебание
to overlap – перекрываться
paradigmatic – характерный
phenomenological – феноменологический
pictorial – наглядный
polarizability – поляризуемость
to prescribe – описывать, определять
profoundly – очень, глубоко
quantum tunneling – квантовое туннелирование
quasi-wave-vector – квазиволновой вектор
ramp – наклонная плоскость
readily – охотно
recoil energy – энергия отдачи

to reconcile – согласовать
reflectivity – коэффициент отражения
refractive index – коэффициент преломления
to render – превратить
to retain – сохранять
satisfactory – удовлетворительный
self-doping – самодопинг
spatial – пространственный
speckles – пятна
superposition – суперпозиция
swift – быстрый, резкий
synergistic – синергетический
tractability – управляемость
trough – впадина, минимум
uniform field – однородное поле
wave-function – волновая функция
wave-particle duality – корпускулярно-волновой дуализм
to yield – давать, приносить

Список литературы

- [1] F. Andreoli *et al.*, *Maximum Refractive Index of an Atomic Medium*, [Phys. Rev. X **11**, 011026 \(2021\)](#).
- [2] L. Mandelstam and I. Tamm, *The Uncertainty Relation between Energy and Time in Non-Relativistic Quantum Mechanics*, [J. Phys. \(Moscow\) **9**, 249 \(1945\)](#).
- [3] M. R. Lam *et al.*, *Demonstration of Quantum Brachistochrones between Distant States of an Atom*, [Phys. Rev. X **11**, 011035 \(2021\)](#).
- [4] M. Motta *et al.* (Simons Collaboration on the Many-Electron Problem), *Ground-State Properties of the Hydrogen Chain: Dimerization, Insulator-to-Metal Transition, and Magnetic Phases*, [Phys. Rev. X **10**, 031058 \(2020\)](#).