УДК 530.145
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-366-321

Бакирова Э.М., Ногаев М.А., Алымбаева Ж.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ,
И.Арабаев атындагы КМУ
Бакирова Э.М.,[1] Ногаев М.А.,[2] Алымбаева Ж.[1]
КНУ имени Жусупа Баласагына,[1]
КГУ имени И.Арабаева[2]
Bakirova E.M., Nogaev M.A., Alymbaeva Zh.
KNU Jusup Balasagyn,
KSU named after I. Arabaev

ЖАРАТЫЛЫШТЫН КВАНТТЫК-МЕХАНИКАЛЫК СҮРӨТТӨЛҮШҮ
КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИРОДЫ
QUANTUM-MECHANICAL DESCRIPTION OF NATURE

Кыскача мүнөздөмө: Кванттык механика - табияттагы эң майда бөлүкчөлөрдүн, атап айтканда электрондордун, фотондордун, атомдордун жана башка кванттык объектилердин жүрүм-турумун сүрөттөгөн фундаменталдык теория. Ал так математикалык негиздерди философиялык терең мазмун менен айкалыштырып, корпускулалык-толкундук дуализмди, Гейзенбергдин аныксыздык принцибин, туннелдик эффектти жана суперпозиция абалдарын түшүндүрөт. Кванттык мыйзамдар материянын түзүлүшүн, заттардын химиялык касиеттерин жана лазерлерден, транзисторлордон тартып кванттык компьютерлерге чейинки заманбап технологиялардын илимий негизин түзөт. Бул теория микробөлүкчөлөр дүйнөсүн ачып, реалдуулуктун ыктымалдык мүнөзгө жана динамикалык касиетке ээ экенин көрсөттү. Салыштырмалуулуктун жалпы теориясы менен толук бирдиктүү түшүндүрмөгө келе электигине карабастан, кванттык механика Ааламды таанып-билүүдөгү эң так теориялардын бири бойдон калууда.

Аннотация: Квантовая механика - фундаментальная теория, описывающая поведение мельчайших частиц природы: электронов, фотонов, атомов и других квантовых объектов. Она сочетает строгую математическую основу с философской глубиной, объясняя корпускулярно-волновой дуализм, принцип неопределённости Гейзенберга, туннельный эффект и суперпозицию состояний. Квантовые законы лежат в основе строения материи, химических свойств веществ и современных технологий - от лазеров и транзисторов до квантовых компьютеров. Теория раскрыла мир микрочастиц, показав, что реальность имеет вероятностный и динамический характер. Несмотря на то что квантовая механика пока не объединена в единую теоретическую систему с общей теорией относительности, она остаётся одной из наиболее точных теорий познания Вселенной.

Abstract: Quantum mechanics is a fundamental theory that describes the behavior of the smallest particles in nature, including electrons, photons, atoms, and other quantum objects. It combines a rigorous mathematical foundation with philosophical depth, explaining wave-particle duality, the Heisenberg uncertainty principle, the tunneling effect, and the superposition of states. Quantum laws underlie the structure of matter, the chemical properties of substances, and modern technologies, from lasers and transistors to quantum computers. The theory revealed the world of microscopic particles, demonstrating that reality has a probabilistic and dynamic nature. Although quantum mechanics has not yet been unified into a single theoretical framework with general relativity, it remains one of the most precise theories for understanding the universe.

Негизги сөздөр: кванттык механика; суперпозиция; туннелдик эффект; толкун функциясы; кванттык талаа; кванттык компьютерлер.

Ключевые слова: квантовая механика; суперпозиция; эффект туннелирования; волновая функция; квантовое поле; квантовые компьютеры.

Keywords: quantum mechanics; superposition; tunneling effect; wave function; quantum field; quantum computers.

Введение. Квантовая механика является одним из наиболее значимых достижений современной физики и человеческой научной мысли. Она описывает поведение мельчайших частиц природы - электронов, фотонов, кварков, атомов и других квантовых объектов, то есть таких систем, которые невозможно наблюдать непосредственно и свойства которых существенно отличаются от поведения тел макромира.

Особенность квантовой механики заключается в том, что, несмотря на сложность и необычность её положений, она представляет собой одну из наиболее точных и экспериментально подтверждённых теорий микромира. Её предсказания многократно проверялись в ходе различных экспериментов и показали высокую степень соответствия наблюдаемым физическим явлениям.

Вместе с тем квантовая механика сохраняет глубокий теоретический и философский интерес. Она использует абстрактные математические понятия, такие как волновая функция и вероятностная амплитуда, которые не наблюдаются напрямую, но позволяют описывать измеряемые характеристики квантовых систем. В научной среде до сих пор продолжаются дискуссии о физической интерпретации отдельных положений квантовой теории.

Именно сочетание высокой экспериментальной точности, математической строгости и философской глубины делает квантовую механику одной из ключевых теорий современного естествознания. Она позволяет исследовать процессы, происходящие на микроуровне, и одновременно ставит фундаментальные вопросы о природе реальности, измерения и причинности.

Квантовые законы лежат в основе строения материи. Они определяют свойства элементарных частиц, атомов и молекул, а также объясняют многие физические и химические процессы. Понимание квантовых закономерностей стало фундаментом для развития современных технологий, включая лазеры, транзисторы, микрочипы, квантовые компьютеры, системы связи и высокоточные измерительные устройства.

Практическое использование квантовых эффектов, таких как сверхпроводимость, туннелирование электронов и квантовая запутанность, показывает не только теоретическую значимость квантовой механики, но и её прикладной потенциал. Эти явления, несмотря на свою необычность для классического восприятия, подчиняются строгим законам природы и играют важную роль в развитии современной науки и технологий.

Концепция квантового поля существенно изменила научные представления о природе материи. В отличие от классических взглядов, согласно которым материя рассматривалась как совокупность неделимых частиц, движущихся в пустом пространстве, современная физика описывает её как проявление квантовых полей, находящихся во взаимодействии друг с другом. В рамках такого подхода частицы понимаются как локализованные возбуждения соответствующих полей.

При изучении атомов и элементарных частиц квантовые эффекты приобретают определяющее значение. Одним из фундаментальных положений квантовой механики является принцип неопределённости Гейзенберга, согласно которому невозможно одновременно с произвольной точностью определить координату и импульс частицы. Чем точнее определяется положение электрона, тем менее точно может быть определён его импульс, и наоборот. Данный принцип не связан с несовершенством измерительных приборов, а отражает фундаментальное свойство природы на квантовом уровне. Экспериментальные данные подтверждают, что поведение субатомных частиц подчиняется вероятностным закономерностям. Из этого следует, что в квантовой механике невозможно указать точное местоположение электрона в классическом смысле. Можно лишь рассчитать вероятность его обнаружения в той или иной области пространства с использованием

математического аппарата квантовой теории. Состояние электрона описывается волновой функцией, которая подчиняется уравнению Шрёдингера.

Таким образом, в рамках квантовой теории сформировалось новое понимание соотношения частицы и волны. Частица и волна рассматриваются не как взаимоисключающие понятия, а как взаимодополняющие способы описания квантового объекта. Электрон проявляет корпускулярные свойства при взаимодействии и волновые свойства при распространении. Вероятность обнаружения частицы в определённой области пространства определяется волновой функцией, амплитуда которой подчиняется строгим математическим законам.

Корпускулярно-волновой дуализм является одним из ключевых принципов квантовой физики. Он изменил научные представления о микромире и показал, что на квантовом уровне физическая реальность имеет вероятностный, динамический и взаимосвязанный характер.

Наглядным примером проявления корпускулярно-волнового дуализма является опыт с двумя щелями. Если направить пучок электронов на экран с двумя узкими щелями, а за ним расположить детектор, фиксирующий попадание электронов, то с точки зрения классической физики следовало бы ожидать появления двух полос, соответствующих двум щелям.

Однако в действительности на экране возникает интерференционная картина - чередование светлых и тёмных полос, характерное для волн. Это свидетельствует о том, что поведение электрона не может быть полностью описано только как движение частицы по одной определённой траектории. Его состояние описывается волновой функцией, распределённой в пространстве. При прохождении через две щели вероятностные амплитуды интерферируют, формируя закономерное распределение вероятностей попадания электронов на экран. Если же производится измерение, позволяющее установить, через какую именно щель прошёл электрон, интерференционная картина исчезает, и электрон проявляет корпускулярные свойства. Это показывает, что процесс измерения играет существенную роль в квантовой механике и влияет на результат наблюдаемого явления.

Несмотря на то что многие физики XX века, включая А. Эйнштейна, с осторожностью относились к вероятностной интерпретации квантовой механики, последующие эксперименты неоднократно подтверждали точность её предсказаний. Квантовая теория показала, что даже наиболее необычные с точки зрения классической физики явления могут быть строго описаны математически и подтверждены экспериментально.

Одним из важных квантовых явлений является туннельный эффект, или квантовое туннелирование. Согласно классической физике, частица не может преодолеть потенциальный барьер, если её энергия меньше высоты этого барьера. Однако в квантовой механике волновая природа частицы приводит к тому, что существует ненулевая вероятность её прохождения через такой барьер. Туннелирование является не парадоксом и не исключением из физических законов, а следствием волнового описания квантовых объектов. Данный эффект многократно подтверждён экспериментально и имеет важное прикладное значение. Без учёта туннельного эффекта невозможно объяснить работу ряда современных устройств. Например, туннельный диод представляет собой электронный прибор, в котором прохождение тока через энергетический барьер связано с квантовым туннелированием. На этом же принципе основана работа сканирующего туннельного микроскопа, позволившего получать изображения поверхности вещества с атомным разрешением.

Значение квантовой механики проявляется и в том, что многие современные технологии основаны на использовании квантовых эффектов. Современная электроника, включая компьютеры, мобильные телефоны, лазеры, полупроводниковые приборы, транзисторы, интегральные микросхемы, фотонные детекторы и лазерные резонаторы, функционирует благодаря законам квантовой физики.

Квантовая теория также объясняет устойчивость атомов. Согласно классическим представлениям, электрон, движущийся вокруг положительно заряженного ядра, должен был бы непрерывно излучать электромагнитные волны, терять энергию и за очень малое время упасть на ядро. Однако в действительности атомы устойчивы, поскольку электрон в атоме может находиться только в определённых энергетических состояниях.

Переход между энергетическими уровнями возможен лишь при испускании или поглощении кванта энергии - фотона. Именно квантование энергии объясняет устойчивость атомов и предотвращает их самопроизвольное разрушение в рамках классической модели.

Таким образом, квантовая механика является одной из наиболее успешных теорий в истории науки. Её предсказания отличаются чрезвычайно высокой точностью. В частности, расчёты квантовой электродинамики для магнитного момента электрона демонстрируют очень высокое совпадение с экспериментальными данными.

Вместе с тем квантовая теория принципиально отличается от классической физики вероятностным характером своих фундаментальных положений. Если классическая механика описывает движение тел через определённые траектории и значения координат и импульсов, то квантовая механика позволяет предсказывать вероятности различных исходов измерения. Она описывает не единственно возможный результат события, а распределение вероятностей его возможных результатов.

Парадоксальным образом, именно эти «зыбучие пески вероятностей» лежат в основе всех чудес современной цивилизации. Без квантовых принципов были бы невозможны ни лазеры, ни транзисторы, ни микроволновые печи, ни интернет, ни радары, ни сотовая связь. Наш мир, с его передовыми технологиями, буквально построен на вероятностных законах микромира.

Квантовая теория показала, что Вселенная на фундаментальном уровне не является ни строго детерминированной, ни полностью случайной - она управляется законом вероятностей, в котором наблюдатель и наблюдаемое оказываются неразрывно связаны. И именно это делает квантовую физику не только величайшим достижением науки, но и источником самых глубоких философских размышлений о природе бытия.

Как писал Ричард Фейнман, один из основателей квантовой электродинамики, квантово-механическое описание природы «абсурдно с точки зрения здравого смысла, и при этом оно полностью согласуется с экспериментом - так что, я надеюсь, вы сможете принять эту природу в её абсурдном образе». Именно это сочетание парадоксальности и точности делает квантовую механику уникальной: несмотря на её противоречие обыденной логике, все экспериментальные данные без исключения подтверждают её выводы.

Фундаментальные принципы квантовой теории. Эта теория почти без усилий объяснила десятки фундаментальных вопросов, над которыми человечество размышляло веками. Из чего состоит материя? Что придаёт ей устойчивость и внутреннюю целостность? Почему она способна существовать в столь разнообразных формах - в виде газов, жидкостей, кристаллов, металлов, горных пород, органических веществ, стекла, молний, звёзд и галактик? Ответ оказался в том, что все эти формы - лишь разные проявления одних и тех же квантовых законов, действующих на всех уровнях бытия.

Новая теория, получившая название квантовой механики, стала одним из величайших интеллектуальных переворотов в истории науки. Именно она впервые дала человечеству математически строгие и логически стройные формулировки, позволившие заглянуть в глубины микромира и раскрыть тайны атомного устройства. Мир субатомных частиц - электронов, протонов, нейтронов, а затем и ещё более фундаментальных объектов - долгое время оставался запретной зоной для физиков. Ещё в начале XX века он казался чем-то недостижимым, лежащим за пределами наблюдения и понимания. Но именно квантовая механика открыла дверь в этот скрытый от глаз мир.

Чтобы осознать масштаб этой революции, стоит вспомнить, насколько скептически научное сообщество относилось к идее атомов всего за несколько десятилетий до её торжества. Ещё в начале 1920-х годов многие уважаемые физики и философы считали «атом» скорее удобной моделью, чем реальностью. Они утверждали, что-то, чего невозможно увидеть напрямую или измерить в лабораторных условиях, попросту не существует. Эти взгляды были наследием классической физики, в рамках которой материя воспринималась как непрерывная и детерминированная.

Однако уже к середине 1920-х годов ситуация изменилась стремительно и решительно. В 1925–1926 годах Вернер Гейзенберг, Эрвин Шредингер, Макс Борн и их современники создали первоначальные математические модели атома. Гейзенберг разработал матричную механику, описывающую энергетические уровни атома с помощью алгебраических структур, а Шредингер предложил волновую механику, показав, что электрон в атоме ведёт себя как стоячая волна, описываемая волновым уравнением - знаменитым уравнением Шредингера.

Эти подходы, внешне совершенно разные, вскоре были признаны эквивалентными. С ошеломляющей точностью они объяснили спектр излучения атома водорода - ту самую задачу, над которой физики безуспешно бились десятилетиями. Квантовая теория впервые позволила предсказать наблюдаемые свойства атома, не прибегая к гипотезам, а исключительно на основе строгих математических принципов.

К началу 1930-х годов развитие квантовой механики достигло поразительного уровня. Такие выдающиеся учёные, как Поль Дирак, продемонстрировали, что основные законы химии - структура периодической системы элементов, свойства связей, устойчивость молекул - могут быть выведены прямо из фундаментальных уравнений квантовой механики.

Так родилась уверенность, что квантовая теория способна, по сути, описать любую форму материи, существующую во Вселенной, - от простейшего атома водорода до сложнейших химических соединений, из которых состоят живые организмы и звёздные недра.

Блистательный взлёт квантовой механики в первой половине XX века сопровождался не только удивительно точным объяснением свойств атомного и субатомного мира, но и коренным пересмотром самого понимания физической реальности. Квантовая теория показала, что на уровне элементарных частиц действуют законы, резко отличающиеся от привычных нам законов классической физики. Она описывает Вселенную как вероятностную, динамичную и исполненную флуктуаций - где частицы могут находиться в состоянии суперпозиции, «размытости» и взаимодействовать через квантовые поля.

Сравнение с классической физикой и общей теорией относительности. Почти одновременно с этим в другой области физики произошла не менее великая революция. Альберт Эйнштейн выдвинул общую теорию относительности, предложив совершенно новое понимание гравитации. Согласно его идее, гравитация - это не просто сила притяжения между телами, как считал Ньютон, а проявление геометрии пространства-времени, которое искривляется под действием массы и энергии. Эта теория стала основой современной космологии и позволила описывать такие явления, как расширение Вселенной, движение планет, черные дыры и гравитационные волны.

Однако вскоре выяснилось, что два эти величайших научных достижения - квантовая механика и общая теория относительности - хотя и описывают один и тот же мир, формально несовместимы друг с другом. Квантовая механика господствует в микромире - в мире атомов и элементарных частиц, где проявляются дискретность энергии и вероятностный характер событий. Общая теория относительности, напротив, описывает макромир - планеты, звёзды, галактики, то есть области, где пространство-время можно считать непрерывным и гладким.

Главная трудность в том, что квантовые принципы плохо сочетаются с геометрической природой гравитации. Попытка «квантовать» пространство-время приводит к бесконечностям коллапс и математическим противоречиям, которые невозможно устранить стандартными методами. Это фундаментальное несоответствие стало одной из самых сложных и загадочных проблем современной теоретической физики.

С середины XX века многие поколения учёных пытались найти путь к единой теории, которая примирила бы «теорию малого» - квантовую механику - с «теорией большого» - общей теорией относительности. Эти поиски привели к появлению целого ряда направлений: квантовой теории поля гравитации, петлевой квантовой гравитации, супергравитации и особенно теории струн, в которой элементарные частицы рассматриваются не как точки, а как крошечные колеблющиеся струны, существующие в многомерном пространстве.

При этом противоречие между квантовой механикой и теорией гравитации сегодня не имеет практических последствий. Это связано с тем, что каждая из теорий применяется к своему классу задач. Квантовая механика прекрасно работает на масштабах атомов и элементарных частиц, а общая теория относительности - в космических масштабах, где гравитация становится решающим фактором. Их области действия почти не пересекаются. Лишь в экстремальных условиях - например, вблизи сингулярностей чёрных дыр или в первые мгновения после Большого взрыва - обе теории становятся одновременно необходимыми, и именно там рождается потребность в новой, объединяющей физике.

На сегодняшний день известно около ста разновидностей атомов, соответствующих различным химическим элементам. Все вещества - твёрдые тела, жидкости, газы, органические соединения и минералы - представляют собой различные комбинации этих элементов. Сами атомы имеют сложную внутреннюю структуру: они состоят из крошечного, но чрезвычайно плотного ядра, вокруг которого движутся электроны. Ядро, в свою очередь, образовано протонами (частицами с положительным зарядом) и нейтронами (не имеющими электрического заряда). Именно взаимодействие этих частиц, подчиняющееся законам квантовой физики, определяет всё богатство химических и физических свойств вещества.

Ключевые различия между геометрической теорией Эйнштейна и квантовой теорией микромира. Эйнштейн рассматривал гравитацию как непрерывное искривление пространства-времени под действием массы и энергии. Квантовая же теория утверждает, что энергия всегда передаётся дискретными «порциями», и даже свет, который в классической физике считался волной, пришлось «дробить» на мельчайшие частицы - фотоны. Энергия каждого фотона пропорциональна его частоте и выражается формулой $E = h\nu$, где h - это постоянная Планка - фундаментальная физическая величина, определяющая масштаб квантовых явлений.

В масштабах повседневной жизни эти квантовые эффекты практически не заметны. Энергия отдельных квантов настолько мала, что квантовые поправки к законам Ньютона оказываются ничтожно малыми. Поэтому для описания движения планет, падения тел или колебаний маятника можно без труда пользоваться классической механикой. Именно поэтому в обычной жизни мы можем «забыть» о квантовой природе мира - хотя именно она лежит в его основе.

Альберт Эйнштейн и Эрвин Шредингер скептически относились к вероятностной интерпретации квантовой теории. Эйнштейн, придерживаясь ньютоновского детерминизма, верил в существование объективной физической реальности, независимой от наблюдателя, где каждый объект имеет определённое состояние. Его известная фраза «Бог не играет в кости» отражала неприятие идеи, что фундаментальные законы природы носят вероятностный характер. Тем не менее именно эта вероятностная природа квантовой теории легла в основу всей современной физики и технологий, определяющих цивилизацию XXI века - от транзисторов и лазеров до квантовых компьютеров и атомных часов.

Эта интерпретация подразумевает существование условной границы между микромиром квантовых объектов, где господствуют вероятности и суперпозиции, и макромиром, в котором действуют законы классической физики. В микромире каждая частица описывается волновой функцией $\Psi(r, t)$, и квадрат её модуля определяет вероятность обнаружить частицу в заданной области пространства. Но в макроскопическом мире волновые функции теряют когерентность и системы приобретают определённые классические свойства.

Долгое время копенгагенская интерпретация считалась основной, и в большинстве учебников по квантовой механике именно она излагается как стандартная точка зрения. Однако по мере развития нанофизики и квантовой электроники стало очевидно, что граница между микромиром и макромиром не является принципиальной. Современные технологии позволяют манипулировать отдельными атомами и даже единичными электронами - например, при помощи туннельных сканирующих микроскопов, что свидетельствует о непрерывности и единстве физической картины мира. Следовательно, жёсткое разделение между квантовыми и классическими процессами не имеет фундаментального характера.

Некоторые физики и философы, включая Юджина Вигнера, выдвигали гипотезу, что сам акт наблюдения связан с сознанием наблюдателя, и что сознание играет фундаментальную роль в коллапсе волновой функции. Вигнер даже предполагал существование космического сознания, аналогичного идеям ведической философии, согласно которой всё сущее пронизано универсальным полем сознания. Хотя эта идея не имеет строгого физического подтверждения, она отражает стремление объяснить связь между квантовыми процессами и феноменом восприятия.

Если рассматривать историческую перспективу, то развитие физики - это последовательность великих научных революций, каждая из которых открывала новые законы природы и радикально меняла ход человеческой цивилизации.

Ньютон, сформулировав законы движения и всемирного тяготения, заложил основу механической картины мира, приведшей к промышленной революции.

Фарадей и Максвелл, установив единство электрического и магнитного взаимодействий, породили электрическую революцию XIX века.

Эйнштейн и основатели квантовой механики раскрыли релятивистскую и вероятностную природу реальности, что привело к революции информационных и квантовых технологий XX–XXI веков.

Таким образом, квантовая теория, несмотря на свою парадоксальность, не только раскрыла глубинные закономерности микромира, но и стала фундаментом современного научно-технического прогресса. Она навсегда изменила наше представление о пространстве, времени, материи и самом существовании человека во Вселенной.

Заключение. Квантовая механика - величайшее достижение науки, сочетание парадоксальности и точности, изменившее наше понимание реальности. Она лежит в основе современных технологий и раскрывает фундаментальные законы Вселенной. Её вероятностная природа объясняет, как стабильность материи, так и многочисленные чудеса современного мира - от лазеров и транзисторов до квантовых компьютеров и атомных часов.

Эта теория навсегда изменила наше представление о пространстве, времени, материи и самом существовании человека во Вселенной, став инструментом, с помощью которого человечество может постигать невидимое и непостижимое.

Список использованной литературы

1. Семихатов А. Сто лет недосказанности: Квантовая механика для всех в 25 эссе / А. Семихатов. – М.: Альпина нон-фикшн, 2025. – 372 с.
2. Гриббин Д. Шесть невозможностей: Загадки квантового мира / Д. Гриббин; пер. с англ. – М.: Альпина нон-фикшн, 2024. – 141 с.
3. Каку М. Квантовое превосходство: Революция в вычислениях, которая изменит всё / М. Каку; пер. с англ. – М.: Альпина нон-фикшн, 2024. – 412 с.
4. Фейнман Р. Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман! / Р. Фейнман; пер. с англ. С. Ильина. – М.: АСТ, 2023. – 480 с.

Рецензент: доктор технических наук, профессор Исмаилов Б.И.