**Основные концепции физики ХХ века**

**Революция в физике**

Физика XIX века представляла собой основанную на механике Ньютона систему знаний, которая создателям этой системы представлялась почти завершенной. Революция в физике уже в самом начале ХХ века выявила ограниченность классической механики, чем поставила под сомнение истинность подобных представлений. Классическая физика, исходя из заложенного Декартом идеала, представляла Вселенную в виде механической системы, поведение которой можно абсолютно точно предсказать, если известны параметры, которые определяют начальное состояние этой системы. Иными словами, основные утверждения классической механики имеют вполне определенный и однозначный характер. Разного рода неопределенности и неоднозначности, могущие иметь место при измерении величин, объясняются в ее рамках неизбежными погрешностями, сложностью процедуры измерения и т.п.

Подобная картина основывалась на предположениях, которые считались совершенно очевидными. Первое заключалось в том, что мы живем в жестком и определенном мире, в котором любое явление может быть строго локализовано, и что все развитие физического мира есть изменение положения тел в пространстве с течением времени. Второе исходило из возможности сделать пренебрежимо малым возмущение естественного хода изучаемого процесса, вносимое процедурой осуществления эксперимента. Как оказалось, оба предложения могут быть справедливыми лишь для определенных условий.

Открытие кванта действия выявило противоречие между концепцией строгой локализации и концепцией динамического развития. Каждая из этих концепций, взятая в отдельности от другой, может быть успешно использована для изучаемых явлений, но, будучи одновременно использованными, они не дают точных результатов. Обе они - своего рода идеализация: первая - статистическая, исключающая всякое движение и развитие, вторая - динамическая, исключающая понятие точного положения в пространстве и момента времени. В классической механике перемещения в пространстве и определение скорости изучаются вне зависимости от того, каким образом физически эти перемещения реализуются. От абстрактного изучения законов движения можно переходить к динамике. Применительно к явлениям микромира подобная ситуация, как выявилось, невозможна принципиально. Здесь пространственно-временная локализация, лежащая в основе кинематики, возможна лишь для некоторых частных случаев, которые зависят от конкретных динамических условий движения. В макромасштабах использование кинематики вполне допустимо. Для микромасштабов, где главная роль принадлежит квантам, кинематика, изучающая движение вне зависимости от динамических условий, теряет смысл.

Для масштабов микромира и второе положение оказывается несостоятельным - оно справедливо лишь для явлений большого масштаба. Выявилось, что попытки измерить какую-либо величину, характеризующую изучаемую систему, влечет за собой неконтролируемое изменение других величин, характеризующих данную систему: если предпринимается попытка установить положение в пространстве и времени, то это приводит к неконтролируемому изменению соответствующей сопряженной величины, которая определяет динамическое состояние системы. Так, невозможно точно измерить в одно и то же время две взаимно сопряженные величины. Чем точнее определяется значение одной величины, характеризующей систему, тем более неопределенным оказывается значение сопряженной ей величины. Это обстоятельство повлекло за собой существенное изменение взглядов на понимание детерминизма, уровней организации реальности.

Детерминизм классической механики исходил из того, что будущее в известном смысле полностью содержится в настоящем - этим и определяется возможность точного предвидения поведения системы в любой будущий момент времени. Такая возможность предлагает одновременное определение взаимно сопряженных величин. В области микромира это оказалось невозможным, что и вносит существенные изменения в понимание возможностей предвидения и взаимосвязи явлений природы: раз значение величин, характеризующих состояние системы в определенный момент времени, можно установить лишь с долей неопределенности, то исключается возможность точного предсказания значений этих величин в последующие моменты времени - можно лишь предсказать вероятность получения тех или иных величин. В этом случае связь между результатами последовательных измерений не будет отвечать требованиям классического детерминизма. Здесь можно говорить о вероятностной связи, связанной с неопределенностью, вытекающей из существования кванта действия.

Другая революционная идея, повлекшая за собой изменение классической физической картины мира, касается создания теории поля. Классическая механика пыталась свести все явления природы к силам, действующим между частицами вещества - на этом основывалась концепция электрических жидкостей. В рамках этой концепции реальными были лишь субстанция и ее изменения - здесь важнейшим признавалось описание действия двух электрических зарядов с помощью относящихся к ним понятий. Описание же поля между этими зарядами, а не самих зарядов было весьма существенным для понимания действия зарядов. Созданной новой реальности места в механической картине мира не было. В результате физика стала иметь дело с двумя реальностями - веществом и полем. Если классическая физика строилась на понятии вещества, то с выявлением новой реальности физическую картину мира приходилось пересматривать. Попытки объяснить электромагнитные явления с помощью эфира оказалось несостоятельными. Эфир экспериментально обнаружить не удалось. Это привело к созданию теории относительности, заставившей пересмотреть представления о пространстве и времени, характерные для классической физики. Таким образом, две концепции - теория квантов и теория относительности - стали фундаментом для новых физических концепций. Д. Бернал выделил три фазы в развитии научной революции. Первая фаза охватывала период с 1895 по 1916 год. Для нее характерно исследование новых миров, создание новых представлений, главным образом с помощью технических и теоретических средств науки ХХ века. Это период в основном индивидуальных достижений супругов Кюри, Резерфорда, Планка, Эйнштейна, Бора и др. Физические исследования ведутся в университетских лабораториях, они слабо связаны с промышленностью, используемая аппаратура дешева и проста.

Вторая фаза (1919-1939 гг.) характеризуется массовым внедрением промышленных методов и организованности в физические исследования. Хотя в это время фундаментальные исследования ведутся главным образом в университетских лабораториях, отдельные крупные ученые начинают возглавлять научные группы, начинают устанавливать связи с крупными промышленными исследовательскими лабораториями. Растет число ученых. Физика расширяет сферу своей деятельности. Начинается военное использование физических знаний, начинается установление связи между руководителями физических исследований с промышленными и государственными организациями в военных целях.

Третья фаза характеризуется еще большим расширением участия физики в военных программах. Физические исследования требуют дорогостоящей аппаратуры, становятся все более дорогостоящими, в их организации все большую роль играет государство.

Современный этап развития физических исследований становится еще более дорогостоящим, что ставит вопрос о необходимости международной кооперации в осуществлении наиболее крупных проектов. Физика стала основой естествознания. Появление и развитие таких разделов физики, как квантовая механика, квантовая электродинамика, общая теория относительности, теория строения атомов, физика атомного ядра и субатомных частиц, квантовая физика твердого тела, квантовая физическая теория строения химических соединений привело к созданию новой физической картины мира, к превращению физики из науки, которая изучает и объясняет механизм явлений, в науку, разрабатывающую методы искусственного воспроизведения физических процессов, в основу современных технических устройств, в лидера современного естествознания.

**Теория относительности**

**а) Кризис классических представлений о пространстве и времени**

Вначале вспомним, что концепция света Френеля включала признание существования эфира, заполняющего все пространство и проникающего во все тела, в котором распространялись световые волны. Концепция света Максвелла понятие эфира сделала не нужным. Несмотря на это, концепция эфира не сошла с арены физики. Дело заключалось в том, что уравнения электродинамики Максвелла были справедливыми в одной системе координат и несправедливыми в другой, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой. Классическая механика, исходившая из признания существования абсолютного времени, единого для всех систем отсчета и любых наблюдателей, признавала, что расстояние между двумя точками пространства должно иметь одно значение во всех системах координат, используемых для определения положения тел в пространстве (т.е. данное расстояние является инвариантом). Преобразование Галилея определяло преобразование координат при переходе от одной системе отсчета к другой. Иначе говоря, если, например, уравнения Ньютона были справедливыми в системе координат, связанной с неподвижными звездами, то они оказывались справедливыми и в других системах отсчета, которые двигались прямолинейно и равномерно относительно данных неподвижных звезд. Таким образом, получалось, что уравнения Максвелла справедливы только в одной системе отсчета, связанной с некоей средой, заполняющей всю вселенную. Вот эту среду и продолжали считать эфиром. Все различие с первоначальной трактовкой эфира заключалось в том, что если раньше под эфиром понимали особую упругую среду, которая была способна передавать световые колебания, то теперь эфиру стала отводиться роль абстракции, необходимой для фиксации тех систем отсчета, в которых справедливы уравнения Максвелла. Однако и данную роль эфир не мог играть.

Изучение световых явлений в движущейся системе координат предполагало определение скорости данной системы координат относительно эфира. Однако никому не удавалось в эксперименте обнаружить движение Земли относительно эфира, что находилось в противоречии с классической теорией. Знаменитый эксперимент Майкельсона-Морли (1887 г.) все сомнения, основывающиеся на несовершенстве используемой при проведении эксперимента, полностью отверг и позволил окончательно отказаться от концепции эфира. Г.А.Лоренц попытался отрицательный результат эксперимента Майкельсона-Морли согласовать с существующими теориями, высказав предположение о том, что тела при своем движении относительно эфира сокращаются в размерах этого движения. Такой подход позволял сохранить концепцию эфира: эфир существует, он неподвижен, движение тела относительно эфира обнаружить невозможно, поскольку в направлении движения тело меняет свои размеры. Из уравнений Лоренца следовало, что все световые явления будут протекать одинаково в разных системах координат, поэтому по этим явлениям обнаружить абсолютное движение по отношению к эфиру невозможно. В свете этого отрицательный результат эксперимента Майкельсона-Морли выглядел вполне естественным, а точная связь наблюдателей, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, выражаясь не преобразованиями Галилея, а преобразованиями Лоренца. Понимание причин замены преобразований Галилея преобразованиями Лоренца и выяснение физических следствий этой замены потребовало пересмотра понятий пространства и времени.

Вспомним также, как развивались представления о пространстве и времени. Для аристотельской физики характерно представление о покое как естественном состоянии любого тела. Это значит, что в движение тело может прийти только под действием силы или импульса. Следствием такого представления был вывод о том, что тяжелые тела должны падать с большей скоростью, чем легкие т.к. они сильнее притягиваются к Земле. В рамках этой традиции законы, которым подчинялась Вселенная, выводились умозрительно и не проверялись на опыте.

Галилей, заложивший начало современных представлений о законах движения тел, первым подверг сомнению представления аристотелевской физики. Скатывая по гладкому откосу шары разного веса, Галилей установил, что скорость увеличивается независимо от веса тела - на катящееся тело всегда действует одна и та же сила (вес тела), в результате чего скорость тела возрастала. Это означало, что приложенная к телу сила не просто заставляет это тело двигаться (как полагали до Галилея), а изменяет скорость тела. Ньютон на основе произведенных Галилеем измерений вывел законы движения. Первый закон: всякое тело пребывает в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока действующие на него силы не изменят это состояние. Второй закон: произведение массы тела на его ускорение равно действующей силе, а направление ускорения совпадает с направлением силы. Третий закон: действию всегда соответствует равное и противоположно направленное действие (иначе: действия двух тел друг на друга всегда равны по величине и направлены в противоположные стороны). Кроме этих законов Ньютоном открыт закон всемирного тяготения: всякое тело притягивает любое другое тело с силой, пропорциональной массам этих тел. Чем дальше находятся тела друг относительно друга, тем меньше сила взаимодействия. Гравитационная сила притяжения звезды составляет четвертую часть силы притяжения такой же звезды, расположенной на вдвое меньшем расстоянии. Данный закон позволяет с большой точностью вычислять орбиты планет.

Если для Аристотеля состояние покоя считалось предпочтительным (если на тело не действует какая-то сила), то из законов Ньютона следовало, что единого эталона покоя нет. Это значит, что можно считать тело А движущимся относительно покоящегося тела В и наоборот - считать тело В движущимся относительно покоящегося тела А. Отсюда следует, что невозможно определить, имели ли место два события в одной точке пространства, если они произошли в разные моменты времени. Иначе говоря, никакому событию нельзя приписать абсолютного положения в пространстве (как считал Аристотель). Это вытекало из законов Ньютона. Но это противоречило идее абсолютного бога. Поэтому Ньютон не признавал отсутствия абсолютного пространства, т.е. того, что следовало из открытых законов.

Общим для Аристотеля и Ньютона было признание абсолютного времени - оба полагали, что время между двумя событиями можно измерить однозначно и что результат не зависит от того, кто осуществляет измерения, лишь бы были в наличии у измеряющего правильные часы. Время считалось полностью отделенным от пространства и не зависящим от него.

В 1676 г., за одиннадцать лет до выхода "Математических начал натуральной философии" Ньютона, датский астроном О.Х.Ремер установил, что свет распространяется с конечной, хотя и очень большой скоростью. Но лишь Д.К.Максвеллу - создателю классической электродинамики - удалось объединить две частные теории, описывавшие электрические и магнитные силы. Согласно сформулированным Максвеллом уравнениям, описывающим электромагнитные явления в произвольных средах и в вакууме, в электромагнитном поле могут существовать распространяющиеся с постоянной скоростью волны (радиоволны с длиной метр и более, волны сверхвысокочастотного диапазона с длиной порядка сантиметра, волны инфракрасного диапазона с длиной до десяти тысячных сантиметра, волны видимого сектора с длиной сорок - восемьдесят миллионных долей сантиметра, волны ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения с длиной волны еще более короткой.

Из теории Максвелла вытекало, что радиоволны и свет имеют фиксированную скорость распространения. Но поскольку после появления теории Ньютона представления об абсолютном покое ушли в прошлое, возник вопрос: относительно чего измерять скорость. Для этого было введено понятие эфира - особой субстанции, заполнявшей пространство. Стали считать, что световые волны распространяются в эфире (как звуковые в воздухе), а скорость распространения определяется относительно эфира. Наблюдатели, движущиеся относительно эфира с разными скоростями, должны были видеть, что свет к ним идет с разной скоростью, но скорость света относительно эфира должна оставаться неизменной. Это означало, что при движении Земли в эфире по своей орбите вокруг Солнца скорость света в направлении движения в сторону источника света должна быть выше по сравнению со скоростью света при условии отсутствия движения к источнику света. Однако опыт, поставленный А.Майкельсоном и Э.Морли в 1887 г., в котором они сравнивали скорость света, измеренную в направлении движения Земли, со скоростью, измеренной в перпендикулярном этому направлению движения, показал, что обе скорости одинаковы. Датский физик Х.Лоренц результат эксперимента Майкельсона-Морли объяснял тем, что все движущиеся в эфире объекты сокращаются в размерах, а часы замедляют свой ход.

Следующий шаг сделал А.Энштейн созданием специальной теории относительности, из которой вытекало. что при условии отказа от понятия абсолютного времени нет никакой надобности в эфире. (Чуть позже аналогичную позицию высказал и А.Пуанкаре.)

**б) Специальная теория относительности**

Специальная теория относительности основывалась на постулате относительности: законы науки должны быть одинаковыми для всех свободно движущихся наблюдателей независимо от скорости их движения. Это означало, что скорость света для любых наблюдателей, независимо от их скорости движения должна быть одинаковой. Важно отметить два следствия, вытекавшие из данного постулата. Первое - закон эквивалентности массы и энергии. Второе - закон, по которому ничто не может двигаться быстрее света.

Из закона эквивалентности массы и энергии (Е =mc2, где Е - энергия, m - масса, с - скорость света) следует, что чем больше энергия, тем труднее увеличить скорость, причем данный эффект больше проявляется при скоростях, близких к скорости света. (Так, например, при скорости тела, составляющей 10% скорости света, масса данного тела увеличивается на 0,5%, тогда как при скорости тела, равной 90% от скорости света, его масса увеличивается в 2 раза.) По мере приближения скорости тела к скорости света его масса увеличивается все быстрее. Для дальнейшего ускорения требуется все больше энергии. Но скорость тела никогда не может достигнуть скорости света, поскольку в этом случае масса тела оказывается бесконечно большой, а потому для достижения такой скорости потребовалось бы бесконечно большая энергия. Таким образом, принцип относительности позволяет двигаться со скоростью света лишь телам, не обладающим нулевой массой (массой покоя), и налагает запрет на достижение скорости света всем телам, обладающим нулевой массой.

Второе следствие из постулата относительности касается изменения представлений о пространстве и времени. Если в теории Ньютона время прохождения светового импульса, посланного из одной точки в другую и измеренное разными наблюдателями, будет одинаковым (ибо время абсолютно), а пройденный им путь может оказаться разным у разных наблюдателей (ибо пространство не абсолютно), а разные наблюдатели получат разные скорости света (ибо скорость света есть пройденное светом расстояние, деленное на время), то в теории относительности у каждого наблюдателя должен быть свой масштаб времени, измеряемого с помощью имеющихся у него часов, причем показание одинаковых часов, имеющихся у разных наблюдателей, могут не согласоваться. Оказывается, что в рамках теории относительности нет надобности в понятиях абсолютного времени и эфира, но зато происходит смена представлений о пространстве и времени - теперь они не существуют как нечто не связанное друг с другом, а существует единое пространство-время. Событие, как нечто происходящее в определенный момент времени и в определенной точке пространства оказалось возможным характеризовать четырьмя координатами.

Специальная теория относительности объяснила постоянство скорости света для всех наблюдателей и позволила описать, что происходит при движении со скоростями, близкими к световым. Но она не согласовывалась с ньютоновской теорией гравитации, в соответствии с которой тела притягиваются друг к другу с силой, которая зависит от расстояния между ними. Это предполагает бесконечную скорость распространения гравитационных эффектов, а не равную или меньшую, как это требует теория относительности. Требовалось создать модель гравитации, согласовывающуюся со специальной теорией относительности. Эйнштейн в своей общей теории относительности высказал предположение о том, что гравитация является следствием искривления пространства-времени, вызванного распределенными в нем массой и энергией. Искривленность пространства-времени означает, что свет распространяется не прямолинейно, а искривляется в гравитационных полях. В нормальных условиях эффект искривления луча зафиксировать наблюдателю трудно, но это можно сделать во время солнечного затмения, когда Луна перекрывает солнечный свет. Это предсказание теории было подтверждено наблюдениями в западной Африке в 1919 г. английской экспедицией.

Другое предсказание общей теории относительности касалось того, что время вблизи массивных тел должно течь медленнее. Это предсказание было проверено в 1962 г. Оказалось, что часы, расположенные ближе к поверхности земли, действительно шли медленнее расположенных выше. Помимо общего интереса данный результат имеет большое значение для навигационных систем - игнорирование предсказаний общей теории относительности приводит к ошибкам при определении координат в несколько километров.

Таким образом, теория движения Ньютона отбросила представления об абсолютном пространстве, а теория относительности - об абсолютном времени. В общей теории относительности нет единого абсолютного времени. До создания общей теории относительности пространство и время выступали как место для событий, на которое все происходящее не влияет. В общей теории относительности пространство и время изменяются под влиянием происходящих процессов и сами влияют на них. Оказалось, что говорить о пространстве и времени вне пределов Вселенной бессмысленно. Старые представления о вечной и почти не изменяющейся Вселенной сменились представлениями об изменяющейся Вселенной, которая имела начало и возможно будет иметь конец.

Таким образом, к началу ХХ века обнаружилась необходимость в коренном пересмотре представлений о пространстве и времени. Эксперименты свидетельствовали, что принцип относительности Галилея (в соответствии с которым механические явления протекают одинаково во всех инерционных системах отсчета) может быть отнесен и к области электромагнитных явлений, а потому уравнения Максвелла не должны изменять свою форму при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, т.е. должны быть инвариантными. Но это оказалось возможным лишь для случаев, когда преобразования координат и времени при таком переходе отличаются от преобразований Галилея, используемых в ньютоновской механике. Лоренц выразил эти преобразования, но не смог дать им верную интерпретацию - она оказалась возможной в рамках специальной теории относительности, выявившей ограниченность механической картины мира. Все попытки свести электромагнитные процессы к механическим процессам в эфире выявили свою несостоятельность, следствием чего и был вывод о том, что поведение формы материи в виде электромагнитного поля не укладываются в рамки законов механики.

**в) Общая теория относительности**

Специальная теория относительности имеет дело с инерциальными системами координат, принцип относительности рассматривается применительно к прямолинейному и равномерному движению. Что же касается непрямолинейного или ускоренного движения, то принцип относительности в его прежней формулировке здесь оказывается несправедливым, ибо в движущейся ускоренной системе координат механические, оптические и электромагнитные явления протекают не так, как в инерциальных системах отсчета. Правильное описание этих физических явлений, учитывающее влияние на них ускорения, оказалось возможным на основе использования криволинейных координат в четырехмерном пространстве (четырехмерном пространственно-временном континууме Минковского). Эйнштейн предположил, что особенность сил тяготения заключается в том, что они всегда пропорциональны массе тела, на которое они действуют. Отсюда следовало, что все тела при одних и тех же начальных условиях движутся в поле тяготения независимо от массы или заряда, т.е. их траектория движения не зависит от свойств движущегося тела, а определяется свойствами поля тяготения. Это позволяет влияние поля тяготения, действующего в определенной части пространства, учитывать путем введения локальной кривизны четырехмерного пространства. В специальной теории относительности четырехмерный пространственно-временной континуум является эвклидовым (плоским). Можно предположить, что четырехмерное пространство может быть и неэвклидовым, т.е. обладать переменной кривизной. В этом случае определение тела в пространстве возможно лишь с помощью криволинейной системы координат. Таким образом, под действием сил тяготения тела изменяют свои размеры и время течет в зависимости от величины этих сил, т.е. поле тяготения меняет свойства пространства и времени. Электромагнитное поле существует в пространстве и времени, а гравитационное поле выражает геометрию пространства и времени. В соответствии с общей теорией относительности геометрия Евклида применима лишь к пустым пространствам, где нет тяжелых тел. Вблизи же тяжелых тел пространство изогнуто.

Общая теория относительности - общая физическая теория пространства, времени и тяготения - явилась новым этапом в развитии теории тяготения. Эйнштейн характеризовал отличие новой теории тяготения от старой следующим образом:

1. Гравитационные уравнения общей теории относительности могут быть применены к любой системе координат. Выбрать какую-либо особую систему координат в специальном случае - дело лишь удобства. Теоретически допустимы все системы координат. Игнорируя тяготение, мы автоматически возвращаемся к инерциальной системе специальной теории относительности.

2. Ньютонов закон тяготения связывает движение тела здесь и теперь с действием другого тела в то же самое время на далеком расстоянии. Этот закон стал образцом для всего механического мировоззрения. Но механическое мировоззрение потерпело крах. В уравнениях Максвелла мы создали новый образец для законов природы. Уравнения Максвелла суть структурные законы. Они связывают события, которые происходят теперь и здесь, с событиями, которые происходят немного позднее и в непосредственном соседстве. Они суть законы, описывающие электромагнитное поле. Наши новые гравитационные уравнения суть также структурные законы, описывающие изменение поля тяготения. Схематически мы можем сказать: переход от ньютоновского закона тяготения к общей теории относительности до некоторой степени аналогичен переходу от теории электрических жидкостей и закона Кулона к теории Максвелла.

3. Наш мир неевклидов. Геометрическая природа его образована массами и их скоростями. Гравитационные уравнения общей теории относительности стремятся раскрыть геометрические свойства нашего мира."[[1]](#footnote-1)

Итак, механическая картина мира оказалась несостоятельной в силу того, что было невозможно объяснить все явления, исходя из предположения о действии между неизменными частицами простых сил. Попытки перехода от механических представлений к понятию поля были успешными в области электромагнитных явлений. Структурные законы, сформулированные для электромагнитного поля, связали события, смежные в пространстве и времени. Это были законы специальной теории относительности. Общая теория относительности сформулировала структурные законы, описывающие поле тяготения между материальными телами, она обратила внимание на ту роль, которую играет геометрия в описании физической реальности.

В настоящее время специальная теория относительности подтверждена экспериментально. Так. например, предсказанное этой теорией увеличение массы электронов при приближении их к скорости света подтвердилось неоднократно. Эквивалентность массы и энергии также доказана экспериментами в ядерной физике. Что же касается общей теории относительности, то столь же утвердительные экспериментальные доказательства ее истинности отсутствуют. Многие физики пока не считают достаточно утвердительными факты, приводимые в ее пользу : малое вековое смещение перигелия Меркурия, слабое отклонение проходящих вблизи Солнца световых лучей интерпретируются по-разному. Более убедительным представляется аргумент, связанный с измерением красного смещения спектральных линий, которые излучаются спутником Сириуса. Однако единственный аргумент не является доказательством достоверности. Данная теория не является законченной. Существуют различные точки зрения на понимание сущности общей теории относительности, отличные от эйнштейновской. Вместе с тем данная теория является одним из самых выдающихся теоретических построений, демонстрирующих внутреннюю логическую стойкость и вносящих в физику множество многообразных идей.

Завершая данный раздел, важно зафиксировать еще раз следующий факт. Существуют вещество и поле как различные физические реальности. Попытки физиков XIX века построить физику на основе только понятия вещества оказались несостоятельными. Построить физику на основе лишь понятия поля пока не удалось. Так что во всех теоретических построениях приходится признавать обе реальности. Но в связи с этим встает проблема взаимодействия элементарных частиц с полем. Попытки решения этой проблемы приводят к квантовой физике.

**Квантовая теория**

**а) Предпосылки квантовой теории**

В конце XIX века выявилась несостоятельность попыток создать теорию излучения черного тела на основе законов классической физики. Из законов классической физики следовало, что вещество должно излучать электромагнитные волны при любой температуре, терять энергию и понижать температуру до абсолютного нуля. Иными словами. тепловое равновесие между веществом и излучением было невозможно. Но это находилось в противоречии с повседневным опытом.

Более детально это можно пояснить следующим образом. Существует понятие абсолютно черного тела - тела, поглощающего электромагнитное излучение любой длины волны. Спектр его излучения определяется его температурой. В природе абсолютно черных тел нет. Наиболее точно абсолютно черному телу соответствует замкнутое непрозрачное полое тело с отверстием. Любой кусок вещества при нагревании светится и при дальнейшем повышении температуры становится сначала красным, а затем - белым. Цвет от вещества почти не зависит, для абсолютно черного тела он определяется исключительно его температурой. Представим такую замкнутую полость, которая поддерживается при постоянной температуре и которая содержит материальные тела, способные испускать и поглощать излучения. Если температура этих тел в начальный момент отличалась от температуры полости, то со временем система (полость плюс тела) будет стремиться к термодинамическому равновесию, которое характеризуется равновесием между поглощаемой и измеряемой в единицу времени энергией. Г.Кирхгоф установил, что это состояние равновесия характеризуется определенным спектральным распределением плотности энергии излучения, заключенного в полости, а также то, что функция, определяющая спектральное распределение (функция Кирхгофа), зависит от температуры полости и не зависит ни от размеров полости или ее форм, ни от свойств помещенных в нее материальных тел. Так как функция Кирхгофа универсальна, т.е. одинакова для любого черного тела, то возникло предположение, что ее вид определяется какими-то положениями термодинамики и электродинамики. Однако попытки такого рода оказались несостоятельными. Из закона Д.Рэлея следовало, что спектральная плотность энергии излучения должна монотонно возрастать с увеличением частоты, но эксперимент свидетельствовал об ином: вначале спектральная плотность с увеличением частоты возрастала, а затем падала. Решение проблемы излучения черного тела требовало принципиально нового подхода. Он был найден М.Планком.

Планк в 1900 г. сформулировал постулат, согласно которому вещество может испускать энергию излучения только конечными порциями, пропорциональными частоте этого излучения (см. раздел "Возникновение атомной и ядерной физики"). Данная концепция привела к изменению традиционных положений, лежащих в основе классической физики. Существование дискретности действия указывало на взаимосвязь между локализацией объекта в пространстве и времени и его динамическим состоянием. Л. де Бройль подчеркивал, что "с точки зрения классической физики эта связь представляется совершенно необъяснимой и гораздо более непонятной по следствиям, к которым она приводит, чем связь между пространственными переменными и временем, установленная теорией относительности."[[2]](#footnote-2) Квантовой концепции в развитии физики было суждено сыграть огромную роль.

Следующим шагом в развитии квантовой концепции было расширение А.Эйнштейном гипотезы Планка, что позволило ему объяснить закономерности фотоэффекта, не укладывающиеся в рамки классической теории. Сущность фотоэффекта заключается в испускании веществом быстрых электронов под действием электромагнитного излучения. Энергия испускаемых электронов при этом от интенсивности поглощаемого излучения не зависит и определяется его частотой и свойствами данного вещества, но от интенсивности излучения зависит число испускаемых электронов. Дать объяснение механизму освобождаемых электронов не удавалось, поскольку в соответствии с волновой теорией световая волна, падая на электрон, непрерывно передает ему энергию, причем ее количество в единицу времени должно быть пропорционально интенсивности волны, падающей на него. Эйнштейн в 1905 году высказал предположение о том, что фотоэффект свидетельствует о дискретном строении света, т.е. о том, что излучаемая электромагнитная энергия распространяется и поглощается подобно частице (названной затем фотоном). Интенсивность падающего света при этом определяется числом световых квантов, падающих на один квадратный сантиметр освещаемой плоскости в секунду. Отсюда число фотонов, которые испускаются единицей поверхности в единицу времени. должно быть пропорционально интенсивности освещения. Многократные опыты подтвердили это объяснение Эйнштейна, причем не только со светом, но и с рентгеновскими и гамма-лучами. Эффект А.Комптона, обнаруженный в 1923 году, дал новые доказательства существования фотонов - было обнаружено упругое рассеяние электромагнитного излучения малых длин волн (рентгеновского и гамма-излучения) на свободных электронах, которое сопровождается увеличением длины волны. Согласно классической теории, при таком рассеянии длина волны не должна меняться. Эффект Комптона подтвердил правильность квантовых представлений об электромагнитном излучении как о потоке фотонов - он может рассматриваться как упругое столкновение фотона и электрона, при котором фотон передает электрону часть своей энергии, а потому его частота уменьшается, а длина волны увеличивается.

Появились и другие подтверждения фотонной концепции. Особенно плодотворной оказалась теория атома Н.Бора (1913 г.), выявившая связь строения материи с существованием квантов и установившая, что энергия внутриатомных движений может меняться также лишь скачкообразно. Таким образом, признание дискретной природы света состоялось. Но ведь по сути своей это было возрождение отвергнутой ранее корпускулярной концепции света. Поэтому вполне естественно возникли проблемы: как совместить дискретность структуры света с волновой теорией (тем более, что волновая теория света подтверждалась целым рядом экспериментов), как совместить существование кванта света с явлением интерференции, как явления интерференции объяснить с позиции квантовой концепции? Таким образом, возникла потребность в концепции, которая увязывала бы корпускулярный и волновой аспекты излучения.

**б) Принцип соответствия**

Для устранения трудности, возникшей при использовании классической физики для обоснования устойчивости атомов (вспомним, что потеря энергии электроном приводит к его падению на ядро), Бор предположил, что атом в стационарном состоянии не излучает (см. предыдущий раздел). Это означало, что электромагнитная теория излучения для описания электронов, движущихся по стабильным орбитам, не годится. Но квантовая концепция атома, отказавшись от электромагнитной концепции, не могла объяснить свойства излучения. Возникла задача: попытаться установить определенное соответствие между квантовыми явлениями и уравнениями электродинамики с целью понять, почему классическая электромагнитная теория дает верное описание явлений большого масштаба. В классической теории движущийся в атоме электрон излучает непрерывно и одновременно свет разных частот. В квантовой же теории электрон, находящийся внутри атома на стационарной орбите, наоборот, не излучает - излучение кванта происходит лишь в момент перехода с одной орбиты на другую, т.е. излучение спектральных линий определенного элемента является дискретным процессом. Таким образом, налицо два совершенно различных представления. Можно ли их привести в соответствие и если да, то в какой форме?

Очевидно, что соответствие с классической картиной возможно лишь при одновременном испускании всех спектральных линий. В то же время очевидно, что с квантовой позиции излучение каждого кванта является актом индивидуальным, а поэтому для получения одновременного испускания всех спектральных линий необходимо рассматривать целый большой ансамбль атомов одинаковой природы, в котором осуществляются различные индивидуальные переходы, приводящие к испусканию различных спектральных линий конкретного элемента. В этом случае понятие интенсивности различных линий спектра необходимо представлять статистически. Для определения интенсивности индивидуального излучения кванта необходимо рассматривать ансамбль большого числа одинаковых атомов. Электромагнитная теория позволяет дать описание макроскопических явлений, а квантовая теория тех явлений, в которых важную роль играют множество квантов. Поэтому вполне вероятно, что результаты, полученные квантовой теорией, будут стремиться к классическим в области множества квантов. Согласование классической и квантовой теорий и следует искать в этой области. Для вычисления классических и квантовых частот необходимо выяснить, совпадают ли эти частоты для стационарных состояний, которые отвечают большим квантовым числам. Бор выдвинул предположение о том, что для приближенного вычисления реальной интенсивности и поляризации можно использовать классические оценки интенсивностей и поляризаций, экстраполируя на область малых квантовых чисел то соответствие, которое было установлено для больших квантовых чисел. Данный принцип соответствия нашел подтверждение: физические результаты квантовой теории при больших квантовых числах должны совпадать с результатами классической механики, а релятивистская механика при малых скоростях переходит в классическую механику. Обобщенная формулировка принципа соответствия может быть выражена как утверждение, согласно которому новая теория, которая претендует на более широкую область применимости по сравнению со старой, должна включать в себя последнюю как частный случай. Использование принципа соответствия и придание ему более точной формы способствовали созданию квантовой и волновой механики.

К концу первой половины XX века в исследованиях природы света сложились две концепции - волновая и корпускулярная, которые остались не в состоянии преодолеть разделяющий их разрыв. Возникла настоятельная потребность создать новую концепцию, в которой квантовые идеи должны лечь в ее основу, а не выступать в роли некого "довеска". Реализация этой потребности была осуществлена созданием волновой механики и квантовой механики, которые по сути составили единую новую квантовую теорию - различие заключалось в используемых математических языках. Квантовая теория как нерелятивистская теория движения микрочастиц явилась самой глубокой и широкой физической концепцией, объясняющей свойства макроскопических тел. В качестве ее основы были положены идея квантования Планка-Эйнштейна-Бора и гипотеза о волнах материи де Бройля.

**в) Волновая механика**

Ее основные идеи появились в 1923-1924 гг., когда Л. де Бройлем была высказана мысль о том, что электрон должен обладать и волновыми свойствами, навеянная аналогией со светом. К этому времени представления о дискретной природе излучения и существовании фотонов уже достаточно укрепились, поэтому для полного описания свойств излучения надо было поочередно представлять его то как частицу, то как волну. А поскольку Эйнштейн уже показал, что дуализм излучения связан с существованием квантов, то естественно было поставить вопрос о возможности обнаружения подобного дуализма и в поведении электрона (и вообще материальных частиц). Гипотеза де Бройля о волнах материи получила подтверждение обнаруженным в 1927 г. явлением дифракции электронов: оказалось, что пучок электронов дает дифракционную картину. (Позже будет обнаружена дифракция и у молекул.)

Исходя из идеи де Бройля о волнах материи, Э.Шредингер в 1926 г. вывел основное уравнение механики (которую он назвал волновой), позволяющее определить возможные состояния квантовой системы и их изменение во времени. Уравнение содержало так называемую волновую функцию ψ (пси-функцию), описывающую волну (в абстрактном, конфигурационном пространстве). Шредингер дал общее правило преобразования данных классических уравнений в волновые, которые относятся к многомерному конфигурационному пространству, а не реальному трехмерному. Пси-функция определяла плотность вероятности нахождения частицы в данной точке. В рамках волновой механики атом можно было представить в виде ядра, окруженного своеобразным облаком вероятности. С помощью пси-функции определяется вероятность присутствия электрона в определенной области пространства.

**г) Квантовая (матричная) механика.**

**Принцип неопределенности**

В 1926 г. В.Гейзенберг разрабатывает свой вариант квантовой теории в виде матричной механики, отталкиваясь при этом от принципа соответствия. Столкнувшись с тем, что при переходе от классической точки зрения к квантовой нужно разложить все физические величины и свести их к набору отдельных элементов, соответствующих различным возможным переходам квантового атома, он пришел к тому, чтобы каждую физическую характеристику квантовой системы представлять таблицей чисел (матрицей). При этом он сознательно руководствовался целью построить феноменологическую концепцию, чтобы исключить из нее все, что невозможно наблюдать непосредственно. В этом случае нет никакой необходимости вводить в теорию положение, скорость или траекторию электронов в атоме, поскольку мы не можем ни измерять, ни наблюдать эти характеристики. В расчеты следует вводить лишь те величины, которые связаны с реально наблюдаемыми стационарными состояниями, переходами между ними и сопровождающими их излучениями. В матрицах элементы были расположены в строки и столбцы, причем каждый из них имел два индекса, один из которых соответствовал номеру столбца, а другой - номеру строки. Диагональные элементы (т.е. элементы, индексы которых совпадают) описывают стационарное состояние, а недиагональные (элементы с разными индексами) - описывают переходы из одного стационарного состояния в другое. Величина же этих элементов связывается с величинами, характеризующими излучение при данных переходах, полученными с помощью принципа соответствия. Именно таким способом Гейзенберг строил матричную теорию, все величины которой должны описывать лишь наблюдаемые явления. И хотя наличие в аппарате его теории матриц, изображающих координаты и импульсы электронов в атомах, оставляет сомнение в полном исключении ненаблюдаемых величин, Гейзенберту удалось создать новую квантовую концепцию, составившую новую ступень в развитии квантовой теории, суть которой состоит в замене физических величин, имеющих место в атомной теории, матрицам - таблицам чисел. Результаты, к которым приводили методы, используемые в волновой и матричной механике, оказались одинаковыми, поэтому обе концепции и входят в единую квантовую теорию как эквивалентные. Методы матричной механики, в силу своей большей компактности часто быстрее приводят к нужным результатам. Методы волновой механики, как считается, лучше согласуется с образом мышления физиков и их интуицией. Большинство физиков при расчетах пользуется волновым методом и использует волновые функции.

Гейзенберг сформулировал принцип неопределенности, в соответствии с которым координаты и импульс не могут одновременно принимать точные значения. Для предсказания положения и скорости частицы важно иметь возможность точно измерять ее положение и скорость. При этом чем точнее измеряется положение частицы (ее координаты), тем менее точными оказываются измерения скорости.

Хотя световое излучение состоит из волн, однако в соответствии с идеей Планка, свет ведет себя как частица, ибо излучение и поглощение его осуществляется в виде квантов. Принцип неопределенности же свидетельствует о том, что частицы могут вести себя как волны - они как бы "размазаны" в пространстве, поэтому можно говорить не об их точных координатах, а лишь о вероятности их обнаружения в определенном пространстве. Таким образом, квантовая механика фиксирует корпускулярно-волновой дуализм - в одних случаях удобнее частицы считать волнами, в других, наоборот, волны частицами. Между двумя волнами-частицами можно наблюдать явление интерференции. Если гребни одной волны совпадают с впадинами другой волны, то они гасят друг друга, а если гребни и впадины одной волны совпадают с гребнями и впадинами другой волны, то они усиливают друг друга.

**д) Интерпретации квантовой теории.**

**Принцип дополнительности**

Возникновение и развитие квантовой теории привело к изменению классических представлений о структуре материи, движении, причинности, пространстве, времени, характере познания и т.д., что способствовало коренному преобразованию картины мира. Для классического понимания материальной частицы было характерно резкое ее выделение из окружающей среды, обладание собственным движением и местом нахождения в пространстве. В квантовой теории частица стала представляться как функциональная часть системы, в которую она включена, не имеющая одновременно координат и импульса. В классической теории движение рассматривалось как перенос частицы, остающейся тождественно самой себе, по определенной траектории. Двойственный характер движения частицы обусловил необходимость отказа от такого представления движения. Классический (динамический) детермизм уступил место вероятностному (статистическому). Если ранее целое понималось как сумма составляющий частей, то квантовая теория выявила зависимость свойств частицы от системы, в которую она включена. Классическое понимание познавательного процесса было связано с познанием материального объекта как существующего самого по себе. Квантовая теория продемонстрировала зависимость знания об объекте от исследовательских процедур. Если классическая теория претендовала на завершенность, то квантовая теория с самого начала развертывалась как незавершенная, основывающаяся на ряде гипотез, смысл которых вначале был далеко не ясен, а поэтому ее основные положения получали разное истолкование, разные интерпретации.

Разногласия выявились прежде всего по поводу физического смысла двойственности микрочастиц. Де Бройль вначале выдвинул концепцию волны-пилота, в соответствии с которой волна и частица сосуществуют, волна ведет за собой частицу. Реальным материальным образованием, сохраняющим свою устойчивость, является частица, поскольку именно она обладает энергией и импульсом. Волна, несущая частицу, управляет характером движения частицы. Амплитуда волны в каждой точке пространства определяет вероятность локализации частицы рядом с этой точкой. Шредингер проблему двойственности частицы решает по сути путем ее снятия. Для него частица выступает как чисто волновое образование. Иначе говоря, частица есть место волны, в котором сосредоточена наибольшая энергия волны. Интерпретации де Бройля и Шредингера представляли собой по сути попытки создать наглядные модели в духе классической физики. Однако это оказалось невозможным.

Гейзенбергом была предложена интерпретация квантовой теории, исходя (как было показано ранее) из того, что физика должна пользоваться только понятиями и величинами, основанными на измерениях. Гейзенберг поэтому и отказался от наглядного представления движения электрона в атоме. Макроприборы не могут дать описание движения частицы с одновременной фиксацией импульса и координат (т.е. в классическом смысле) по причине принципиально неполной контролируемости взаимодействия прибора с частицей - в силу соотношения неопределенностей измерение импульса не дает возможности определить координаты и наоборот. Иначе говоря, по причине принципиальной неточности измерения предсказания теории могут иметь лишь вероятностный характер, причем вероятность является следствием принципиальной неполноты информации о движении частицы. Это обстоятельство привело к выводу о крушении принципа причинности в классическом смысле, предполагавшим предсказание точных значений импульса и координаты. В рамках квантовой теории, таким образом, речь идет не об ошибках наблюдения или эксперимента, а о принципиальном недостатке знаний, которые и выражаются с помощью функции вероятности.

Интерпретация квантовой теории, осуществленная Гейзенбергом, была развита Бором и получила название копенгагенской. В рамках данной интерпретации основным положением квантовой теории выступает принцип дополнительности, означающий требование применять для получения в процессе познания целостной картины изучаемого объекта взаимоисключающие классы понятий, приборов и исследовательских процедур, которые используются в своих специфических условиях и взаимозаполняют друг друга. Данный принцип напоминает соотношение неопределенностей Гейзенберга. Если речь идет об определении импульса и координаты как взаимоисключающих и взаимодополняющих исследовательских процедур, то для отождествления этих принципов есть основания. Однако смысл принципа дополнительности шире, чем соотношения неопределенностей. Для того, чтобы объяснить устойчивость атома, Бор соединил в одной модели классические и квантовые представления о движении электрона. Принцип дополнительности, таким образом, позволил классические представления дополнить квантовыми. Выявив противоположность волновых и корпускулярных свойств света и не найдя их единства, Бор склонился к мысли о двух, эквивалентных друг другу, способах описания - волновом и корпускулярном - с последующем их совмещением. Так что точнее говорить о том, что принцип дополнительности выступает развитием соотношения неопределенности, выражающих связи координаты и импульса.

Ряд ученых истолковали нарушение принципа классического детерминизма в рамках квантовой теории в пользу индетернизма. В действительности же здесь принцип детерминизма изменял свою форму. В рамках классической физики, если в начальный момент времени известны положения и состояние движения элементов системы, можно полностью предсказать ее положение в любой будущий момент времени. Все макроскопические системы были подчинены этому принципу. Даже в тех случаях, когда приходилось вводить вероятности, всегда предполагалось, что все элементарные процессы строго детернизированы и что только их большое число и беспорядочность поведения заставляет обращаться к статистическим методам. В квантовой теории ситуация принципиально иная. Для реализации принципов детернизации здесь необходимо знать координаты и импульсы, и это соотношением неопределенности запрещается. Использование вероятности здесь имеет иной смысл по сравнению со статистической механикой: если в статистической механике вероятности использовались для описания крупномасштабных явлений, то в квантовой теории вероятности, наоборот, вводятся для описания самих элементарных процессов. Все это означает, что в мире крупномасштабных тел действует динамический принцип причинности, а в микромире - вероятностный принцип причинности.

Копенгагенская интерпретация предполагает, с одной стороны, описание экспериментов в понятиях классической физики, а с другой - признание этих понятий неточно соответствующими действительному положению вещей. Именно эта противоречивость и обусловливает вероятность квантовой теории. Понятия классической физики составляют важную составную часть естественного языка. Если мы не будем использовать этих понятий для описания проводимых экспериментов, то мы не сможем понять друг друга.

Идеалом классической физики является полная объективность знания. Но в познании мы используем приборы, а тем самым, как говорит Гейнзерберг, в описание атомных процессов вводится субъективный элемент, поскольку прибор создан наблюдателем. "Мы должны помнить, что то, что мы наблюдаем, - это не сама природа, а природа, которая выступает в том виде, в каком она выявляется благодаря нашему способу постановки вопросов научная работа в физике состоит в том, чтобы ставить вопросы о природе на языке, которым мы пользуемся, и пытаться получить ответ в эксперименте, выполненном с помощью имеющихся у нас в распоряжении средств. При этом вспоминаются слова Бора о квантовой теории: если ищут гармонии в жизни, то никогда нельзя забывать, что в игре жизни мы одновременно и зрители, и участники. Понятно, что в нашем научном отношении к природе наша собственная деятельность становится важной там, где нам приходится иметь дело с областями природы, проникнуть в которые можно только благодаря важнейшим техническим средствам"[[3]](#footnote-3)

Классические представления пространства и времени также оказалось невозможным использовать для описания атомных явлений. Вот что писал по этому поводу другой создатель квантовой теории: "существование кванта действия обнаружило совершенно непредвиденную связь между геометрией и динамикой: оказывается, что возможность локализации физических процессов в геометрическом пространстве зависит от их динамического состояния. Общая теория относительности уже научила нас рассматривать локальные свойства пространства-времени в зависимости от распределения вещества во Вселенной. Однако существование квантов требует гораздо более глубокого преобразования и больше не позволяет нам представлять движение физического объекта вдоль определенной линии в пространстве-времени (мировой линии). Теперь нельзя определить состояние движения, исходя из кривой, изображающей последовательные положения объекта в пространстве с течением времени. Теперь нужно рассматривать динамическое состояние не как следствие пространственно-временной локализации, а как независимый и дополнительный аспект физической реальности"[[4]](#footnote-4)

Дискуссии по проблеме интерпретации квантовой теории обнажили вопрос о самом статусе квантовой теории - является ли она полной теорией движения микрочастицы. Впервые вопрос таким образом был сформулирован Энштейном. Его позиция получила выражение в концепции скрытых параметров. Эйнштейн исходил из понимания квантовой теории как статистической теории, которая описывает закономерности, относящиеся к поведению не отдельной частицы, а их ансамбля. Каждая частица всегда строго локализована, одновременно обладает определенными значениями импульса и координаты. Соотношение неопределенностей отражает не реальное устройство действительности на уровне микропроцессов, а неполноту квантовой теории - просто на ее уровне мы не имеем возможности одновременно измерять импульс и координату, хотя они в действительности существуют, но как скрытые параметры (скрытые в рамках квантовой теории). Описание состояния частицы с помощью волновой функции Эйнштейн считал неполным, а потому и квантовую теорию представлял в виде неполной теории движения микрочастицы.

Бор в данной дискуссии занял противоположную позицию, исходящую из признания объективной неопределенности динамических параметров микрочастицы как причины статистического характера квантовой теории. По его мнению, отрицание Энштейном существования объективно неопределенных величин оставляет необъясненным присущие микрочастице волновые черты. Возврат к классическим представлениям движения микрочастицы Бор считал невозможным.

В 50-х гг. ХХ века Д.Бом вернулся к концепции волны-пилота де Бройля, представив пси-волну в виде реального поля, связанного с частицей. Сторонники копенгагенской интерпретации квантовой теории и даже часть ее противников позицию Бома не поддержали, однако она способствовала более углубленной проработке концепции де Бройля: частица стала рассматриваться в виде особого образования, возникающего и движущегося в пси-поле, но сохраняющего свою индивидуальность. Работы П.Вижье, Л.Яноши, разрабатывавших данную концепцию, были оценены многими физиками как слишком "классичными".

В отечественной философской литературе советского периода копенгагенская интерпретация квантовой теории была подвергнута критике за "приверженность к позитивистским установкам" в трактовке процесса познания. Однако рядом авторов отстаивалась справедливость копенгагенской интерпретации квантовой теории.[[5]](#footnote-5) Смена классического идеала научного познания неклассическим сопровождалась пониманием того, что наблюдатель, пытаясь построить картину объекта, не может отвлечься от процедуры измерения, т.е. исследователь оказывается не в состоянии измерять параметры изучаемого объекта такими, какими они были до процедуры измерения. В.Гейзенберг, Э.Шредингер и П.Дирак положили принцип неопределенности в основу квантовой теории, в рамках которой частицы уже не имели определенных и не зависящих друг от друга импульса и координат. Квантовая теория, таким образом, внесла в науку элемент непредсказуемости, случайности. И хотя Эйнштейн не смог согласиться с этим, квантовая механика согласовывалась с экспериментом, а потому стала основой многих областей знания.

**е) Квантовая статистика**

Одновременно с развитием волновой и квантовой механики развивалась другая составная часть квантовой теории - квантовая статистика или статистическая физика квантовых систем, состоящих из большого числа частиц. На основе классических законов движения отдельных частиц была создана теория поведения их совокупности - классическая статистика. Аналогично этому на основе квантовых законов движения частиц была создана квантовая статистика, описывающая поведение макрообъектов в случаях когда законы классической механики не применимы для описания движения составляющих их микрочастиц - в данном случае квантовые свойства проявляются в свойствах макрообъектов. Важно иметь в виду, что под системой в данном случае понимаются лишь взаимодействующие друг с другом частицы. Квантовая система при этом не может рассматриваться как совокупность частиц, сохраняющих свою индивидуальность. Иными словами, квантовая статистика требует отказа от представления различимости частиц - это получило название принципа тождественности. В атомной физике две частицы одной природы считались тождественными. Однако эта тождественность не признавалась абсолютной. Так, две частицы одной природы можно было различать хотя бы мысленно.

В квантовой статистике возможность различить две частицы одинаковой природы полностью отсутствует. Квантовая статистика исходит из того, что два состояния системы, которые отличаются друг от друга лишь перестановкой двух частиц одинаковой природы, тождественны и неразличимы. Таким образом, основное положение квантовой статистики - принцип тождественности одинаковых частиц, входящих в квантовую систему. Этим квантовые системы отличаются от классических систем.

Во взаимодействии микрочасти важная роль принадлежит спину - собственному моменту количества движения микрочастицы. (В 1925 г. Д.Уленбеком и С.Гаудсмитом впервые было открыто существование спина у электрона). Спин д электронов, протонов, нейтронов, нейтрино и др. частиц выражается полуцелой величиной, у фотонов и пи-мезонов - целочисленной величиной (1 или 0). В зависимости от спина микрочастица подчиняется одному из двух разных типов статистики. Системы тождественных частиц с целым спином (бозоны) подчиняются квантовой статистике Бозе-Эйнштейна, характерной особенностью которой является то, что в каждом квантовом состоянии может находиться произвольное число частиц. Данный тип статистики был предложен в 1924 г. Ш.Бозе и затем усовершенствована Энштейном). В 1925 г. для частиц с полуцелым спином (фермионов) Э.Ферми и П.Дирак (независимо друг от друга) предложили другой тип квантовой статики, получивший имя Ферми-Дирака. Характерной особенностью этого типа статики является то, что в каждом квантовом состоянии может находиться произвольное число частиц. Это требование называется принципом запрета В.Паули, который был открыт в 1925 г. Статистика первого типа подтверждается при исследовании таких объектов, как абсолютно черное тело, второго типа - электронный газ в металлах, нуклоны в атомных ядрах и т.д.

Принцип Паули позволил объяснить закономерности заполнения электронами оболочек в многоэлектронных атомах, дать обоснование периодической системе элементов Менделеева. Этот принцип, выражает специфическое свойство частиц, которые ему подчиняются. И сейчас трудно понять, почему две тождественные частицы взаимно запрещают друг другу занимать одно и то же состояние. Подобного типа взаимодействия в классической механике не существует. Какова его физическая природа, каковы физические источники запрета - проблема, ждущая разрешения. Сегодня ясно одно: физическая интерпретация принципа запрета в рамках классической физики невозможна.

Важным выводом квантовой статистики является положение о том, что частица, входящая в какую-либо систему, не тождественна такой же частице, но входящей в систему другого типа или свободную. Отсюда следует важность задачи выявления специфики материального носителя определенного свойства систем.

**ж) Квантовая теория поля**

Квантовая теория поля представляет собой распространение квантовых принципов на описание физических полей в их взаимодействиях и взаимопревращениях. Квантовая механика имеет дело с описанием взаимодействий сравнительно малой энергии, при которых число взаимодействующих частиц сохраняется. При больших энергиях взаимодействия простейших частиц (электронов, протонов и т.д.) происходит их взаимопревращение, т.е. одни частицы исчезают, другие рождаются, причем число их меняется. Большинство элементарных частиц нестабильно, спонтанно распадается до тех пор, пока не образуются стабильные частицы - протоны, электроны, фотоны и нейтроны. При столкновениях элементарных частиц, если энергия взаимодействующих частиц достаточно велика, происходит множественное рождение частиц различного спектра. Поскольку квантовая теория поля предназначена для описания процессов при высоких энергиях, поэтому должна удовлетворять требованиям теории относительности.

Современная квантовая теория поля включает три типа взаимодействия элементарных частиц: слабые взаимодействия, обусловливающие главным образом распад неустойчивых частиц, сильные и электромагнитные, ответственные за превращение частиц при их столкновении.

Квантовая теория поля, описывающая превращение элементарных частиц, в отличие от квантовой механики, описывающей их движение, не является последовательной и завершенной, она полна трудностей и противоречий. Наиболее радикальным способом их преодоления считается создание единой теории поля, в основу которой должен быть положен единый закон взаимодействия первичной материи - из общего уравнения должен выводиться спектр масс и спинов всех элементарных частиц, а также значения зарядов частиц. Таким образом, можно сказать, что квантовая теория поля ставит задачу выработки более глубокого представления об элементарной частице, возникающей за счет поля системы других элементарных частиц.

Взаимодействие электромагнитного поля с заряженными частицами (главным образом электронами, позитронами, мюонами) изучается квантовой электродинамикой, в основе которой лежит представление о дискретности электромагнитного излучения. Электромагнитное поле состоит из фотонов, обладающих корпускулярно-волновыми свойствами. Взаимодействие электромагнитного излучения с заряженными частицами квантовая электродинамика рассматривает как поглощение и испускание частицами фотонов. Частица может испустить фотоны, а затем поглотить их.

Итак, отход квантовой физики от классической заключается в отказе от того, чтобы описывать индивидуальные события, происходящие в пространстве и времени, и использовании статистического метода с его волнами вероятности. Цель классической физики заключается в описании объектов в пространстве и времени и в формировании законов, которые управляют изменением этих объектов во времени. Квантовая физика, имеющая дело с радиоактивным распадом, дифракцией, испусканием спектральных линий и тому подобными явлениями, не может удовлетвориться классическим подходом. Суждение типа "такой-то объект имеет такое-то свойство", характерное для классической механики, в квантовой физике заменяется суждением типа "такой-то объект имеет такое-то свойство с такой-то степенью вероятности". Таким образом, в квантовой физике имеют место законы, управляющие изменениями вероятности во времени, в классической же физике мы имеем дело с законами, управляющими изменениями индивидуального объекта во времени. Разные реальности подчиняются различным по характеру законам.

Квантовая физика в развитии физических идей и вообще стиля мышления занимает особое место. К числу величайших созданий человеческого ума относится, несомненно и теория относительности - специальная и общая, представляющая собой новую систему идей, объединившую механику, электродинамику и теорию тяготения и давшую новое понимание пространства и времени. Но это была теория, которая в определенном смысле была завершением и синтезом физики XIX века, т.е. она не означала полного разрыва с классическими теориями. Квантовая же теория порывала с классическими традициями, она создала новый язык и новый стиль мышления, позволяющий проникать в микромир с его дискретными энергетическими состояниями и дать его описание с помощью введения характеристик, отсутствовавших в классической физике, что в конечном счете позволило понять сущность атомных процессов. Но вместе с тем квантовая теория внесла в науку элемент непредсказуемости, случайности, чем она отличалась от классической науки.

**Концепции физики атомных и ядерных процессов**

**а) Модели атома**

Решающим моментом в развитии теории строения атома было открытие электрона. Наличие в электрически нейтральном атоме отрицательно заряженной частицы побуждало предполагать наличие частицы с положительным зарядом. Модель Д.Томсона, не будучи в состоянии объяснить характер атомных спектров, излучаемых атомами, уступила место планетарной модели Э.Резерфорда. Исследуя рассеяние атомами вещества альфа-частиц, излучаемых радиоактивными веществами, он открыл атомное ядро и построил планетарную модель атома. Оказалось, что атом состоит не из положительно заряженного облака, в котором (подобно изюму в булке) находятся электроны, как это предполагал Д.Томсон, а из электрона и ядра размером около 10-13 см., в котором сосредоточена почти вся масса атома. Атом подобен Солнечной системе: в центре него находится тяжелое ядро, вокруг него вращаются электроны. Однако, согласно электродинамике Максвелла, такой атом не может быть устойчивым: двигаясь по круговым (или эллиптическим) орбитам, электрон испытывает ускорение, а поэтому он должен излучать электромагнитные волны, несущие энергию. Потеря энергии приведет электрон к падению на ядро. Таким образом, подобный атом не может быть устойчивым, а потому в реальности не может существовать. Таким образом, классическая физика не могла найти объяснения устойчивости атомов.

Разработка следующей модели атома принадлежит Н.Бору. Взяв за основу модель Резерфорда, он использовал и идеи квантовой теории. Бор выдвинул предположение, согласно которому в атомах существуют особые стационарные состояния, в которых электроны не излучают - излучение происходит лишь при переходе из одного стационарного состояния в другое.

Внутреннее строение атома изучать непосредственно невозможно, поскольку микроскопические размеры недоступны прямому восприятию, поэтому о структуре атома можно судить по ее косвенным проявлениям макроскопического масштаба. Таким проявлением является излучение атомов под воздействием нагрева или внешнего электрического поля. Изучение спектров излучения позволяет получить данные о внутренней структуре атома - для каждого атома характерны особенности спектра. Классическая физика не могла объяснить законы, которым подчинялись атомные спектры. Модель Бора выявила истинное значение спектральных законов и позволила установить, как эти законы отражают квантовый характер внутренней структуры атома - устойчивость структуры атома оказалась неразрывно связанной с существованием квантов. В модели Бора каждый атом обладает некоторой последовательностью квантовых (стационарных) состояний. Каждый вид атома имеет свою последовательность квантовых значений энергии, соответствующих различным возможным стационарным состояниям. Вывод о том, что в устойчивом состоянии атом не должен излучать, не соответствовал данным классической электродинамики, согласно которым электроны, движущиеся с ускорением, должны были непрерывно излучать электромагнитные волны. Бор и предположил, что каждая спектральная линия соответствует мгновенному переходу атома из одного квантового состояния в другое, которое характеризуется меньшим значением энергии. Избыток энергии при этом уносится в виде отдельных квантов (фотонов).

Модель атома Бора показала свою плодотворность в применении к атому водорода, позволив понять структуру оптического спектра. Но попытка применить данную модель к более сложным атомам, имеющим большее число электронов, выявила ограниченность данной модели - результаты ее применения лишь весьма приблизительно соответствовали данным эксперимента. Кроме того, модель атома Бора располагала методом квантования действия лишь для одномерного движения (предложенного еще Планком). Поэтому необходимо было найти методы квантования для случаев многомерного движения. Этот метод был найден в 1916 г. Ч.Вильсоном и А.Зоммерфельдом (почти одновременно друг с другом) и использован для решения тех задач, которые не могли быть решены с помощью модели атома Бора. Таким путем была создана концепция тонкой структуры линии спектра. Излучение линий спектра водорода с помощью спектрографов с высокой разрешающей способностью позволило выявить тонкую структуру спектра - оказалось, что спектральные линии сами состоят из ряда близко расположенных друг к другу линий. Зоммерфельд высказал предположение о связи тонкой структуры спектральных линий с релятивистскими эффектами и предположил вместо уравнений ньютоновской механики использовать уравнения релятивистской механики. Предположения Зоммерфельда дали результаты, согласуемые с экспериментальными данными. Вместе с тем полученная Зоммерфельдом картина спектральных линий оказалась значительно беднее реальной, поэтому его модель не могла дать достаточно полные объяснения тонкой структуры спектральных линий.

Для модели атома Бора основополагающим является утверждение о том, что электроны внутри атома могут находиться лишь в стационарных состояниях, которые соответствуют определенным квантовым значениям энергии. Следовательно, существуют определенные энергетические уровни, на которых находятся электроны. Как известно, атом каждого последующего элемента имеет на один электрон больше, чем предыдущего. Значит, по мере возрастали атомного номера усложняется структура электронных оболочек атомов. На основе знания этой структуры можно устанавливать физические и химические свойства элементов. В периодической системе Д.И.Менделеева элементы расположены в порядке возрастали атомного веса, причем в расположенных таким образом элементах обнаруживается определенная периодичность в химических свойствах этих элементов. Физическая природа этой периодичности оказывается весьма сложной. Теория атома должна иметь возможность объяснить эту природу. Для этого модель Бора необходимо было дополнить требованием, чтобы на одном энергетическом уровне могло находиться лишь ограниченное число электронов (явление насыщения энергетического уровня электронами). Если бы данного насыщения не существовало, то в нормальном (стабильном) состоянии атома все электроны атома были бы на низшем уровне, который соответствует наименьшей энергии. Но вследствие насыщения уровней подобная ситуация оказывается невозможной.

Двигаясь по периодической системе элементов, можно видеть, как постепенно заполняются друг за другом низшие энергетические уровни - как только низший уровень оказывается заполненным, настает очередь следующего уровня. Тонкая структура спектральных линий при этом свидетельствует о расщеплении энергетических уровней электронов внутри атома на ряд подуровней. Заполняющие эти уровни подуровни электроны (обладающие почти одинаковой энергией) образуют оболочку. При заполнении друг за другом последующих уровней, таким образом, образуются различные оболочки. Изменяемая при движении по таблице Менделеева периодичность свойств объясняется характером заполнения оболочек электронами. Таким образом, исследование спектров играет огромную роль в изучении внутренней структуры атома.

Модель Бора, позволяя определить частоту излучения, не давала возможности определять интенсивность излучения и его поляризацию, что совершенно необходимо для уточнения природы излучения, которое возникает при переходах электронов внутри атома из одного стационарного состояния в другое. Бор этот недостаток пытался устранить с помощью принципа соответствия. Кроме того, модель Бора была непоследовательной: отвергая ряд положений классической механики и электродинамики, она использовала как классические понятия и формулы, так и квантовые. Бор понимал ограниченный характер собственной модели атома. Принцип соответствия указывал на одно из новых направлений. Однако впоследствии, с созданием квантовой механики, было выяснено, что при описании строения атома классические представления не могут иметь места.

**б) Структура атомного ядра**

Исследование структуры атома поставило вопрос о том, что представляет собой ядро, какова его структура. В ядре сосредоточена почти вся масса атома (масса электронов, входящих в атом, пренебрежительно мала по сравнению с массой ядра), оно имеет положительный заряд, эквивалентный суммарному заряду входящих в него электронов. Заряд ядра любого элемента равен его порядковому номеру в периодической системе элементов. Проблема структуры атомного ядра получила разрешение с открытием в 1932 году Д.Чедвиком нейтрона - третьей элементарной частицы после электрона и протона. Масса нейтрона близка к массе протона. Электрический заряд у протона отсутствует Д.Д.Иваненко сформулировал протоно-нейтронную концепцию строения атомного ядра, которую затем разработал В.Гейзенберг. Ядра, состоящие из протонов и нейтронов получили название нуклонов. В том же 1932 году в космических лучах К.Андерсоном был открыт позитрон - положительно заряженный электрон, обеспечивший симметрию между положительным и отрицательным зарядами во взаимоотношениях частиц. Его существование было предсказано П.Дираком, исходившим из того, что положительные заряды во Вселенной представляют собой своего рода недостающие части мирового отрицательного заряда - позитрон есть "дырка" в распределении электронов с отрицательной энергией. Столкновение электрона и позитрона приводит к аннигиляции - их превращению в два фотона, испускаемые в противоположных направлениях.

**в) Процессы ядерного превращения**

Следующий вопрос, который встал перед физиками после выявления структуры атомного ядра, касался сил, скрепляющих нуклоны в ядре. В связи с его расширением выяснилось, что взаимоотношения между нейтроном и протоном не столь просты, как казалось вначале. Оказалось, что точнее говорить о структуре атомного ядра, состоящей из протонов, нейтронов и мезонов. Мезоны, существование которых было в 1935 году предсказано Г.Юкавой и открыто Ч.Андерсоном и С.Неддермейером, и оказались силами притяжения, которые по величине превосходят электрические силы, действующие между одноименно заряженными протонами. Ядерные силы - это вид основных физических сил, действующих в природе, наряду с гравитационными и электромагнитными.

Из всех названных частиц нейтрон оказался наиболее пригодным для осуществления процесса ядерного превращения, поскольку ввиду отсутствия у него заряда он способен глубже проникнуть в вещество, входить в положительно заряженные ядра атомов, которые отталкивают положительно заряженные протоны и альфа-частицы. Благодаря этому в краткий срок было изучено действие нейтронов на различные ядра, что привело к открытию искусственной радиоактивности. Решающее достижение в этой области принадлежит Ф.Жолио Кюри и И.Кюри, установившим, что почти все подвергнутые бомбардировке атомы становятся радиоактивными. Это означало, что естественная радиоактивность является лишь остаточной активностью атомов, которые еще не успели достичь устойчивых состояний. Знание атомных превращений могло помочь объяснить, каким образом возникли элементы.

Начавшееся с 30-х гг. ХХ века создание ускорителей дало возможность повысить эффективность исследований в этой области. Х.А.Бете и Г.А.Гамов способствовали установлению вероятных циклов термоядерных реакций, являющихся источниками внутризвездной энергии. Стало ясно, что источником большей части энергии Вселенной являются ядерные процессы. Встала задача выяснения механизма высвобождения этой энергии. Э.Ферми, подвергнув бомбардировке нейтронами тяжелые элементы, обнаружил огромную эффективность медленных нейтронов. О.Ган и Ф.Штрасман открыли деление ядер урана под действием нейтронов. О.Ган и Л.Мейтнер исследовали продукты распада облученного урана и отыскали среди них элементы до атомного номера 96. Деление ядер стало установленным фактом.

Тяжелые ядра могут иметь больше нейтронов по отношению к числу протонов по сравнению с легкими ядрами. При расщеплении атома урана освобождается несколько нейтронов. Так открылась возможность цепной реакции. Если в ходе ядерного процесса можно было добиться получения больше чем одного эффективного нейтрона на каждый первоначально затраченный нейтрон, реакция убыстрялась. И если этим процессом не управлять, а дать возможность развиваться, то он приводил к взрыву. В случае же управления мы имеем дело с ядерным реактором. Все это привело к созданию Ферми ядерного реактора, осуществлению цепной реакций деления ядер, атомного и термоядерного оружия, атомных электростанций. (О перипетиях всего этого можно познакомиться в специальной литературе). В истории человечества началась новая атомная эра, открытая атомной физикой.

Считается, что реализация концепций атомной ядерной физики стала примером самого быстрого практического применения науки. Оценивая это, Д.Бернал писал: "Если бы это открытие было совершено в более спокойные времена XIX века, оно разрабатывалось бы в конечном счете для практического применения и, быть может, лет через 50 или около того нашло бы свое воплощение в новых машинах для выработки энергии. Отсутствие материальной заинтересованности и тот факт, что капиталы были вложены в уже существовавшие источники энергии, могли бы, однако, еще на бесконечно долгое время задержать развитие производства атомной энергии. Но, как известно, открытие ядерного деления произошло в канун новой мировой войны. По счастью для правительства Англии и Америки, некоторые из тех, кто был изгнан из своей родины нацистами и фашистами, отдавали себе ясный отчет в военных возможностях сделанного открытия. Однако более удивительным было, быть может, то обстоятельство, что им удалось убедить военные и гражданские власти в необходимости крайне энергичной разработки проекта, главным образом потому, что если бы они этого не сделали, то противник, несомненно, первым создал бы свою бомбу“.[[6]](#footnote-6)

Так или иначе, появление подобных научных концепций не только определяет характер современной эпохи, но и будущее общества. Появление концепций, неумение распорядится которыми может грозить уничтожением человечества, активно влияет на характер и формы и формы социального устройства. Человечество, высвободив колоссальные силы, теперь обречено постоянно думать над тем, как распорядиться ими. Эта проблема человечества в практически обозримое время - вечная. Поэтому человечество должно научиться жить с этой проблемой.

**Концепции физики элементарных частиц**

**а) Современный статус понятия Элементарной частицы**

Представление о том, что все во Вселенной делится на вещество и силы, бытующие и в настоящее время, возникло давно. Еще Аристотель (см. раздел "Аристотельская физика") полагал, что на вещество, состоящее из земли, воздуха, огня и воды, действуют две силы: сила тяжести и сила легкости. Первая влечет землю и воду вниз, вторая поднимает огонь и воздух вверх. Аристотелю вещество представлялось непрерывным, а Демокриту - зернистым, состоящим из атомов. Спор между сторонниками данных концепций дошел до ХХ века. В его разрешении важный вклад принадлежит Эйнштейну, который в 1905 г. (еще до публикации статьи о специальной теории относительности) высказал предположение, что броуновское движение (нерегулярное, хаотическое движение мельчайших частичек, взвешенных в воде) можно объяснить ударами атомов жидкости об эти частички. Как было показано ранее, первая попытка доказать структурированность атома предпринял Дж.Томсон. В 1911 г. Э.Резерфорд доказал, что атом состоит из положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг него, отрицательно заряженных электронов. В 1932 г. Дж.Чэдвик обнаруживает, что ядро кроме положительного протона содержит не заряженный нейтрон с массой почти равной массе протона. В 1969 г. эксперименты М.Гелл-Мана по взаимодействию движущихся с большими скоростями протонов и электронов показывают, что протоны состоят из Кварков. Таким образом, было установлено, что ни атомы, ни протоны, ни нейтроны не являются неделимыми. Перед физиками и встал вопрос: что же считать элементарными частицами? Может быть при переходе к еще большим энергиям и эти элементарные частицы окажутся делимыми?

Таким образом, понятие элементарных частиц в настоящее время утратило свой первоначальный смысл как частиц далее неразложимых, поскольку многие из частиц, считавшихся элементарными, имеют сложную структуру (например, протоны и нейтроны). Но осталась сама идея о существовании элементарных частиц. Термин "элементарные частицы" сейчас употребляется в менее строгом значении, а именно для названия большой группы мельчайших частиц материи, которые не являются атомами или атомными ядрами (за исключением протона - простейшего ядра атома водорода). Их число велико (с нестабильными частицами насчитывается более 350) и продолжает расти.

В процессе исследования выявленных элементарных частиц устанавливались их свойства. У электронов и протонов были выявлены масса, размеры, электрический разряд, механический и магнитный момент. В рамках теории Бора были установлены механический и магнитный моменты электрона и протона, являвшихся чисто квантовыми свойствами. Было установлено, что спин - собственный момент количества микрочастицы, имеющий квантовую природу и измеряемый в единицах Планка, - может быть целым (0,1,2...) или полуцелым (1/2, 3/2...).

Исследование бета-распада позволило открыть новое свойство элементарных частиц - их превращаемости друг в друга: при бета-распаде из ядра вылетает электрон, который рождается в результате превращения нейтрона в протон и электрон. Было обнаружено при этом, что электроны, вылетающие из ядра при бета-распаде, обладают различными скоростями и энергией, а оставшиеся после бета-распада ядра обладают примерно одинаковой энергией. Измерения установили, что в случае вылета медленных электронов баланс энергии при бета-распаде не сохраняется, что казалось нарушением закона сохранения в микропроцессах. Идея существования нейтрино, рождающегося при бета-распаде и уносящего недостающую энергию, сохранило справедливость закона сохранения энергии и в микромире. Открытие превращения нейтрона в протон и нейтрон положило начало открытиям других форм превращения элементарных частиц друг в друга.

Следующим выявленным свойством элементарных частиц была способность определенных частиц взаимодействовать друг с другом. В классической физике электрическое взаимодействие между заряженными частицами осуществляется с помощью электромагнитного поля. С точки зрения квантовой физики взаимодействие частиц есть процесс обмена фотонами, в котором фотоны пропадают, отдавая свою энергию заряженным частицам. По аналогии с образованием фотонов появилась идея о том, что подобным образом могут рождаться и электроны. Поиски сил, связывающих в ядре протоны и нейтроны, побудили И.Е.Тамма и Д.Д.Иваненко предположить, что ядерные силы есть результат обмена электронами между нуклонами. Эксперимент эту гипотезу не подтвердил. Юкава показал, что ядерные силы могут быть объяснены как результат обмена между нуклонами частицами с массой больше массы электрона и меньшей массы нуклонов (частицы получили название мезонов-промежуточных частиц), которые и были обнаружены в космических лучах. Переносчиками ядерных сил оказались положительно и отрицательно заряженные мезоны с массой, равной 273 массам электрона, получившие название π-мезонов или пионов. У нейтральных мезонов масса оказалась равной 264 массам электрона.

Дирак высказал мысль о существовании античастицы для электрона, которая была открыта и названа позитроном. Оказалось, что свойством элементарных частиц является существование античастиц , имеющих противоположный заряд и противоположно направленные механический и магнитный моменты. При столкновении частицы и античастицы происходит аннигиляция, т.е. их уничтожение с возникновением других частиц. Так, столкновение электрона и позитрона дает два фотона, протона и антипротона - четыре мезона и т.д.

У частиц было установлено также свойство спонтанного превращения. Элементарные частицы имеют "время жизни" - среднее время своего существования. В настоящее время к числу стабильных частиц с бесконечным временем существования относят электроны и позитроны. К стабильным относят также протоны и антипротоны (хотя высказываются соображения о конечном сроке жизни протонов), а также нейтрино, антинейтрино, фотоны. К настоящему времени назрела необходимость в классификации элементарных частиц (подобной периодической системе Д.И.Менделеева). Эта работа далеко не завершена.

**б) Современные представления о характере фундаментальных физических взаимодействий и типах элементарных частиц**

В физике под взаимодействием понимается воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению состояния их движения. В механике Ньютона взаимодействия характеризуются силой, более общей характеристикой взаимодействия является потенциальная энергия. В трактовке взаимодействия исторически сменяли друг друга разные концепции. Первой возникла концепция дальнодействия, сущность которой заключается в представлении, что взаимодействие между телами может осуществляться непосредственно через пустое пространство, которое участвует в передаче взаимодействия не принимает, причем передача взаимодействия происходит мгновенно. После открытия электромагнитного поля возникла концепция близкодействия. Было установлено, что взаимодействие электрически заряженных частиц осуществляется не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью, равной скорости света. Электромагнитное поле выступает посредником, осуществляющим передачу взаимодействия между электрически заряженными частицами. Данная концепция была перенесена и на другие взаимодействия. В рамках данной концепции взаимодействия между телами осуществляется посредствам разнообразных полей. В рамках квантовой теории трактовке взаимодействия был придан квантовый характер. Поскольку каждое тело состоит из квантов, то, например, электромагнитное взаимодействие осуществляется путем обмена фотонами и т.п.

Существует четыре разновидности взаимодействия (сил), которые физики надеются представить как проявление одной и той же силы (взаимодействия). Оказалось. что классификацию элементарных частиц удобнее всего осуществлять по типам их взаимодействий.

Все известные частицы принято разделять на две группы, в одну из которых входят частицы со спином 1/2 (из них состоит вещество Вселенной), а в другую - частицы со спином 0, 1 и 2 (создающие силы, действующие между частицами вещества).Первые подчиняются принципу запрета Паули, (гласящему, что две одинаковые частицы не могут существовать в одном и том же состоянии). Если бы не действовал принцип Паули, кварки не смогли бы объединится в протоны и нейтроны, которые, в свою очередь, вместе с электронами не смогли бы объединиться в атомы. В 1928 г. П.Дирак разработал теорию, описывающую эти частицы, которая согласовывалась и с квантовой механикой, и со специальной теорией относительности. Теория объяснила, почему электрон со спиной 1/2 при одном полном обороте не возвращается в прежнее положение и возвращается в него лишь при двукратном обороте. Эта теория предсказывала также существование позитрона (антиэлектрона). Оказалось, что каждой частице соответствует античастицы, которые при столкновении аннигилируют (уничтожаются).

Силы между частицами вещества переносятся частицами с целочисленным спином, равным 0, 1 или 2. Эти частицы-переносчики не подчиняются принципу запрета Паули. Это значит, что ограничения для числа обмениваемых частиц отсутствуют, поскольку возникающая сила взаимодействия может быть большой:

Первая из них - гравитационная сила, имеющая универсальный характер. Любая частица находится под действием гравитационной силы. Ее величина зависит от массы или энергии частицы. Гравитационная сила действует на больших расстояниях и всегда выступает как сила притяжения. Гравитационные силы по сравнению с другими очень слабые. Считается, что гравитационная сила, действующая между двумя частицами, переносится частицей со спином 2 (ее называют гравитон). Гравитон собственной массой не обладает, поэтому переносимая им сила является дальнодействующей. Считается, что гравитоны распространяются в виде гравитационных волн, которые пока зафиксировать не удается вследствие их слабой силы.

Вторая сила - электромагнитная, действующая между электрическими заряженными частицами. Электромагнитные взаимодействия значительно сильнее гравитационных. Существуют два вида электрического заряда - положительный и отрицательный. Между двумя положительными или отрицательными зарядами действует сила отталкивания, между положительным и отрицательным - сила притяжения. В больших телах электромагнитная сила слаба, поскольку в них положительных и отрицательных зарядов почти одинаково и они компенсируют друг друга. В малых масштабах ситуация иная - в атомах и молекулах доминируют электромагнитные силы.

Третий тип - слабое взаимодействие, отвечающее за радиоактивность и существующее между всеми частицами вещества со спином 1/2 - в нем не участвуют частицы со спином 0, 1, 2 (фотоны и гравитоны). В1967 г. А.Салам и С.Вайнберг разработали теорию, объединяющую слабое взаимодействие и электромагнитное (подобно объединению Максвеллом электричества и магнетизма). (Несколько позже к ним присоединился Ш.Глэшоу.) Теория предсказывала, что частицы, совершенно различные при низких энергиях, при высоких энергиях оказываются одной и той же частицей, но находящейся в разных состояниях.

Четвертый тип - сильное ядерное взаимодействие, удерживающее кварки внутри протона и нейтрона, а протоны и нейтроны - внутри атомного ядра. Переносчиком этого типа взаимодействия считается частица со спином 1 - глюон. Глюоны взаимодействуют лишь с глюонами и кварками.

Существует идея объединить электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия в теорию великого объединения (на самом деле она не столь великая, поскольку не учитывает гравитацию, но создание такой теории явилось бы шагом на пути к созданию полной теории объединения, охватывающей все четыре типа взаимодействия - подробнее о концепции объединения физики см. раздел 6). Идея великого объединения заключается в следующем. Известно, что сильные взаимодействия при высоких энергиях становятся слабее, чем при низких. Электромагнитные же и слабые силы при высоких энергиях растут. При каком-то очень большом значении энергии эти три силы могли бы сравняться между собой и стать разновидностями одной силы - при этом частицы со спином 1/2 (кварки и электроны) перестали бы различаться. Препятствие на этом пути заключается в том, что для ускорения частиц до такой энергии понадобился бы ускоритель размером с Солнечную систему.[[7]](#footnote-7) Так что возможности экспериментально проверить теорию великого объединения нет. Однако возможна проверка низкоэнергетических следствий. Одно из таких следствий - возможность распада протонов, составляющих большую часть массы обычного вещества на более легкие частицы (антиэлектроны).

Такого рода эксперименты, позволяющие дать определенные сведения о распаде протона, затруднены. Однако, как полагает С.Хокинг,[[8]](#footnote-8) не исключено, что само наше существование есть следствие обратного процесса - процесса образования протонов или кварков на самой начальной стадии, когда кварков не больше, чем антикварков. Он полагает, что такая картина начала Вселенной выглядит наиболее естественной. Ведь земное вещество в основном состоит из протонов и нейтронов, состоящих в свою очередь из кварков. В нашей Галактике тоже нет ни антипротонов, ни антинейтронов (за исключением тех случаев, когда они рождаются в столкновениях частицы и античастицы при высоких энергиях) - если бы наша Галактика имела участки антивещества, то на границе раздела вещества и антивещества наблюдалось бы излучение высокой энергии вследствие аннигиляции. В пределах одной Галактики смеси вещества и антивеществ быть не может. Поэтому более вероятно предположение о том, что все галактики состоят из кварков, а не из антикварков.

Но почему при образовании Вселенной кварков стало больше, чем антикварков? Ранее считалось, что законы физики одинаковы для частиц и античастиц, т.е. все процессы в природе не меняются (симметричны) при одновременном проведении трех преобразований: переходе от частиц к античастицам (зарядовое сопряжение или преобразование симметрии С), зеркальном отражении (пространственная инверсия или преобразование симметрии Р) и замене времени t на -t (обращение времени или преобразование симметрии Т).

**в) Связь принципов симметрии физической системы и законов сохранения (теорема Э.Нетер)**

Считается, что физические теории по начальному состоянию объекта определяет его поведение в будущем. Принципы симметрии (инвариантности) носят общий характер, т.е. им подчиняются все физические теории. Симметрия физических законов относительно некоторого преобразования означает, что при осуществлении данного преобразования эти законы не меняются. Именно поэтому принципы симметрии оказывается возможным устанавливать на основании известных физических законов. В 1918 г. Э.Нетер была сформулирована теорема, устанавливающая связь между свойствами симметрии физической системы и законами сохранения: если свойства системы не меняются при каком-либо преобразовании переменных, то этому соответствует сохранение некоторой физической величины - независимости свойств системы от выбора начала отсчета времени соответствует закон сохранения энергии. Однако, если теория какого-либо физического явления еще не построена, те симметрии, которые были открыты на опыте, имеют для построения теории большое значение. Отсюда вполне понятна важность экспериментально установленных симметрий сильно взаимодействующих элементарных частиц - адронов, теория которых еще не построена.

В 1956 г. Г.Ли и Ч.Янг показали, что на самом деле законы физики не совсем одинаковы для частиц и античастиц. Оказалось, что слабые взаимодействия не подчиняются симметрии Р и симметрии С. Это означало, что в результате слабого взаимодействия развитие Вселенной может быть иным, чем развитие ее зеркального изображения, что Вселенная, состоящая из античастиц будет вести себя иначе, чем наша Вселенная, состоящая из частиц. Была надежда на то, что слабое взаимодействие должно все же подчиняться комбинированной симметрии, т.е., иначе говоря развитие Вселенной должно происходить так, как и развитие ее зеркального отражения, если, отразив Вселенную в зеркале, заменить каждую частицу античастицей. Однако и эта надежда рухнула, когда Д.Кронин и В.Фитч в 1964 г. обнаружили, что нарушается и комбинированная (С Р) симметрия. (С - замена частицы античастицей; Р - зеркальное отражение, когда левое и правое меняются местами; Т - изменение направления движения всех частиц на обратное.) С Р Т - теорема утверждала, что любая теория, подчиняющаяся принципам квантовой механики и теории относительности, всегда должна быть инвариантна относительно комбинированной симметрии С Р Т, т.е. поведение Вселенной не изменится, если частицы заменить античастицами, отразить все в зеркале и изменить направление времени на обратное. Результаты, которые получили Д.Кронин и В.Фитч, свидетельствовали о том, что при замене частицы античастицей, осуществлении зеркального отражения, но при сохранении прежнего направления времени, законы физики должны измениться, т.е. они не будут инвариантны относительно симметрии Т, следовательно, Вселенная будет вести себя при этих условиях иначе.

Что из этого следует? По мнению С.Хокинга, по мере расширения Вселенной под действием сил, не инвариантных относительно симметрии Т, антиэлектроны должны превращаться в кварки чаще, чем электроны в антикварки. После того как Вселенная расширилась и охлаждалась, антикварки и кварки должны были аннигилировать. Но так как кварков было больше чем антикварков, то кварки должны были остаться в каком-то небольшом избытке. Из этих то кварков и состоит сегодняшнее вещество и мы сами. Поэтому само наше существование можно рассматривать как качественное подтверждение теории великого объединения. Последние не включают в себя гравитационного взаимодействия. С.Хокинг считает это не столь существенным, т.к. гравитационными силами по причине их незначительности можно пренебречь в случаях, когда мы имеем дело с элементарными частицами или атомами. Вместе с тем важно учитывать тот факт, что гравитационные силы являются дальнодействующими и проявляются как силы притяжения, результаты их воздействия всегда суммируются. Отсюда следует, что при наличии достаточного количества частиц вещества гравитационные силы могут быть больше всех остальных. Поэтому эволюция Вселенной определяется именно гравитацией.[[9]](#footnote-9)

Сейчас можно говорить, что при взаимодействиях и превращениях элементарных частиц действуют законны сохранения (т.е. законы, согласно которым численные значения некоторых физических величин не изменяются с течением времени при различных процессах) - как важнейшие, строгие из них (законы сохранения энергии, импульса, момента количества движения), так и приближенные, справедливые для определенного круга процессов (законы сохранения лептонного заряда, барионного заряда, четности).

**Концепции объединения физики**

Единую полную теорию всего происходящего во Вселенной построить невозможно, поэтому сначала создаются частные теории, объединяющие какие-то части Вселенной. Надежды на создание непротиворечивой единой теории, в которую войдут все частные теории, не оставляют физиков. Cоздание такой теории принято называть объединением физики. Его созданию Эйнштейн безуспешно отдал последние годы своей жизни. Но, отказавшись принять реальность квантовой механики, ее принцип неопределенности как фундаментальный принцип мироздания, он не смог достичь успех на этом поприще.

С.Хокинг и другие физики-теоретики с оптимизмом (хотя и осторожным) смотрят на возможность построения единой теории, завершающей поиски окончательных законов природы.

Сейчас имеет место общая теория относительности, представляющая собой частную теорию гравитации. Есть частные теории, описывающие слабые, сильные и электромагнитные взаимодействия, - их можно объединить в теории великого объединения. Но последняя физиками не признается удовлетворительной, поскольку не включает гравитацию и содержит величины, которые не выводятся теоретически, а подбираются путем их наилучшего согласия с экспериментом (например, относительные массы разных частиц). Считается, что основной трудностью построения теории, объединяющей гравитацию с другими силами, является невключенность квантово-механического принципа неопределенности в классическую общую теорию относительности. Поэтому исходным моментом создания единой теории является объединение общей теории относительности и принципа неопределенности квантовой механики. В результате этого объединения черные дыры (см. раздел о концепциях астрономии) перестают быть таковыми, исчезают сингулярности, Вселенная становится замкнутой и безграничной. Но в этом случае возникают трудности, обусловленные тем, что, в соответствии с принципом неопределенности, пространство должно быть заполнено парами виртуальных частиц и античастиц, обладающих бесконечной энергией и бесконечной массой. Создаваемое ими гравитационное притяжение должно привести к сворачиванию Вселенной до бесконечно малых размеров. Подобные парадоксы бесконечности обычно устраняются с помощью перенормировки - процедуры введения новых бесконечностей для компенсации старых. В частных теориях полученные с помощью перенормировки предсказания согласуются с результатами наблюдений. В плане же создания полной теории метод перенормировок не позволяет теоретически предсказывать действительные значения масс и сил, поэтому их приходится подбирать подгонкой к эксперименту. Есть лишь два числа, которые можно подгонять при включении принципа неопределенности в общую теорию относительности. Это - величина гравитационной силы и космологическая постоянная. Однако их изменения не могут устранить бесконечность. Получается, что мы имеем теорию, в соответствии с которой некоторые величины (например, кривизна пространства-времени) являются бесконечными, хотя из изменений вытекает, что они конечны. Поэтому для выхода из положения стали использовать так называемую теорию супергравитации, которая бесконечности устраняла, хотя оставалось сомнение в том, все ли бесконечности устранялись, а затем физики обратились к теориям струн в которых прогнозировалось сокращение бесконечностей.[[10]](#footnote-10)

С.Хокинг допускает три варианта ответа на вопрос, возможна ли единая теория. Первый вариант: полная теория может быть сформулирована. Второй вариант: единой полной теории нет, а есть лишь бесконечная последовательность теорий, дающих все более точное описание Вселенной. Третий вариант единой полной теории Вселенной не существует, события в последней происходят произвольно и беспорядочно и не могут быть предсказаны далее некоторого предела. Если ставить цель - найти систему законов, дающих возможность предсказывать события в пределах точности, устанавливаемой принципом неопределенности, то тем самым третий вариант исключается. Вторая возможность, исходящая из существования бесконечной последовательности все более точных теорий, согласуется с нашим опытом. Но последовательность все более точных теорий при переходе к более высоким энергиям может иметь предел. При каких-то энергиях и должна существовать единая теория Вселенной. Столь высокие энергии могли возникнуть на ранних стадиях развития Вселенной. Поэтому изучение ранней Вселенной может привести к созданию полной единой теории.

Если бы полная единая теория оказалась математически непротиворечивой и ее предсказания совпадали с опытом, то "этим завершилась бы длинная и удивительная глава в истории интеллектуальной борьбы человечества за познание Вселенной".[[11]](#footnote-11) Но создание такой теории не означает, что мы сможем предсказывать события вообще, ибо возможности предсказаний ограничиваются, во-первых, принципом неопределенности и, во-вторых, неумением находить точные решения описывающих теорию уравнений (а потому необходима разработка приближенных методов, позволяющих предсказывать результаты в реальных ситуациях).

До недавнего времени считалось, что Вселенная не изменяется со временем - из того, что гравитационные силы являются всегда силами притяжения, следует, что Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. Из общей теории относительности известно, что в прошлом было состояние с бесконечной плотностью и большой взрыв, положивший начало отсчету времени. Если Вселенная начнет сжиматься, то в будущем должно появиться еще одно состояние с бесконечной плотностью произойдет большой хлопок, означающий конец течения времени. В образовавшихся черных дырах возникнут сингулярности, в которых законы перестанут действовать. (См. раздел "Концепции астрономии").

При объединении квантовой механики и общей теории относительности может возникнуть новая возможность, когда пространство и время образуют конечное четырехмерное пространство без сингулярностей и границ. С помощью этой возможности можно было бы объяснить однородность Вселенной в больших масштабах и отклонения от однородности в меньших масштабах (галактики, звезды, человеческие существа), а также существование наблюдаемых стрел времени.

Предположим, что единая полная теория создана - это будет набор правил и уравнений. Но ведь она не отвечает на вопрос, почему должна существовать Вселенная, которую описывает эта теория“ Пока большинство ученых слишком заняты развитием новых теорий, описывающих, что есть Вселенная, и им некогда спросить себя, почему она есть. Философы же, чья работа в том и состоит, чтобы задавать вопрос "почему", не могут угнаться за развитием научных теорий. В XVIII веке философы считали все человеческие знания, в том, числе и науку, полем своей деятельности и занимались обсуждением вопросов типа: было ли у Вселенной начало? Но расчеты и математический аппарат науки XIX и XX вв. стали слишком сложны для философов и вообще для всех, кроме специалистов. Философы настолько сузили круг своих запросов, что самый известный философ нашего века Уитгенштейн (Витгенштейн -А.К.) по этому поводу сказал: "Единственное, что еще остается философии, - это анализ языка". Какое унижение для философии с ее великими традициями от Аристотеля до Канта".[[12]](#footnote-12)

1. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. М.,1965. С.196. [↑](#footnote-ref-1)
2. Бройль Л. де. Революция в физике. М.,1963. С.84. [↑](#footnote-ref-2)
3. Гейзенберг В. Физика и философия. М., 1963. С. 36-37. [↑](#footnote-ref-3)
4. Бройль де Л. Революция в физике.М.,1963.С.187-188. [↑](#footnote-ref-4)
5. См., напр.: Алексеев И.С. Развитие представлений о структуре атома. Философский очерк. Новосибирск,1968. [↑](#footnote-ref-5)
6. Бернал Дж. Наука в истории общества.М.,1956.С.414-415 [↑](#footnote-ref-6)
7. Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. М.,1990. С.70. [↑](#footnote-ref-7)
8. Хокинг С. Там же. С.71-72 [↑](#footnote-ref-8)
9. Хокинг С. Цит.соч. С.74. [↑](#footnote-ref-9)
10. См.: Хокинг С.Цит.соч.С.137-143. [↑](#footnote-ref-10)
11. См.: Хокинг С. Там же.С.142. [↑](#footnote-ref-11)
12. Хокинг С. Цит.соч. С.147. [↑](#footnote-ref-12)