

Естественнонаучная картина мира

Лекция №3

Тема №2. Научные революции в концептуальных основах физики

Электромагнитная теория поля

Электромагнитное поле — физическое поле, взаимодействующее с электрически заряженными телами, а также с телами, имеющими электрические токи или магнитные свойства. Магнитные свойства тел определяются наличием внутренних токов или движений заряженных частиц. **Электромагнитное поле** (и его изменение со временем) описывается в электродинамике в классическом приближении посредством системы дифференциальных уравнений Максвелла. Действие электромагнитного поля на заряженные тела описывается в классическом приближении посредством силы Лоренца. Возмущение электромагнитного поля, распространяющееся в пространстве, называется электромагнитной волной. Любая электромагнитная волна распространяется в пустом пространстве (вакууме) с одинаковой скоростью — скоростью света (свет также является электромагнитной волной). В зависимости от длины волны электромагнитное излучение подразделяется на радиоизлучение, свет (в том числе инфракрасный и ультрафиолет), рентгеновское излучение и гамма-излучение. Вид излучения зависит от частоты электромагнитных колебаний или длины волны и образуют спектр электромагнитного излучения. Радиоволны имеют самую длинную длину волны и низкие частоты (формула $\lambda = c \cdot T$, где λ — длина волны, c — скорость света, T — период электромагнитных колебаний, частота электромагнитных колебаний $f = 1/T$). Так как скорость света постоянна, то по длинам волн/частоте э/м волны можно расположить в порядке убывания длины волны: радиоволны (километровые, метровые, дециметровые или длинные, короткие и ультракороткие), СВЧ (сантиметровые и миллиметровые), инфракрасные или тепловые (100-10 микрометров 10^{-6} метра)), традиционный свет (от красного до синего по радуге, 10-0,1 микрометра), ультрафиолет (нанометры 10^{-9} метра), рентгеновские, гамма-излучение. Зная скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с можно найти диапазоны частот излучения.

Волновая и корпускулярная теории

Проблема столкновения волновой и корпускулярной теории возникла при изучении света и оптики (науки о распространении света и его взаимодействии с телами). Явления преломления, отражения,

рассеяния, прохождения света через среды были известны с древних времен. Интересовал ученых древнего мира и проблема цвета тел, жидкостей, газов, неба. Особенно интересны были работы Архимеда с зеркалами. С появлением линз, оптических приборов (подзорная труба, микроскоп, телескоп) изучение оптики стало очень актуальным. В 17 веке большой вклад в оптику внес Ньютон, который обобщил известные тогда работы и выдвинул стройную теорию геометрической оптики. В этой теории Ньютон рассматривал свет как поток частиц — корпускул, причем его знаменитый опыт с призмой (расщепление белого света на спектр цветов) позволило ему предположить наличие корпускул разного типа для разных цветов. В теории Ньютона объяснялись явления отражения, преломления, рассеивания света и проблема наличия цветов. Однако оставались непонятными явления интерференции и дифракции. Согласно корпускулярной теории между пучками излученных частиц, каковыми является свет, возникали бы столкновения или, по крайней мере, какие-либо возмущения, но все особенности интерференции и дифракции объяснить было трудно. К концу 18 века стало очевидным, что явления интерференции и дифракции можно объяснить только в рамках волновой теории, а не на основе механистической корпускулярной теории света.

Принципиально иным путём объяснял оптические явления голландский ученый Христиан Гюйгенс (1629-1695 г.г.) на основе сформулированной им волновой теории. Он утверждал: «два луча света, пересекаясь, пронизывают друг друга без каких-либо помех, в точности, как два ряда волн на воде». Волновая теория устанавливала аналогию между распространением света, движением волн на поверхности воды и звуковых волн в воздухе. В волновой среде предполагалось наличие упругой среды, заполняющей все пространство - светоносного эфира. Распространение света рассматривалось как распространение колебаний эфира: «Каждая отдельная точка эфира колеблется в вертикальном направлении. Колебания всех точек создают картину волны, перемещаемой в пространстве от одного момента времени к другому». На основе волновой теории Х. Гюйгенс объяснил отражение и преломление света.

Особенно удобной оказалась волновая теория для объяснения интерференции и дифракции как явлений наложения 2-х или более волн друг на друга. Прохождение света через щель давали

дифракционную картину, которая часто была очень четкой. Аналогично можно было наблюдать подобные явления с дифракцией волн воды, которые никак не были связаны с движением частиц. Была разработана математическая теория интерференции и дифракции, которая была проверена в экспериментах и дала точное соответствие. Более того, на основе этих теорий были разработаны специальные приборы — интерферометры, дифракционные решетки, которые стали активно использоваться на практике. С этого времени так же начинается активное изучение спектров излучения. Которое с появлением фотопластинок стало мощным средством изучения окружающего мира. Спектральный анализ позволил определить химический состав звезд и различных тел, особенности излучения горячих тел. Однако изучение таких излучений и фотоэффекта (Столетов) заставило вновь вернуться к корпускулярной теории. Оказалось, что здесь электромагнитное излучение поглощается или излучается дискретными порциями — фотонами. В 1900 году немецкий физик М. Планк при изучении теплового излучения выдвинул предположение, что *атом испускает энергию не непрерывно, «как в классике», а порциями (квантами)*. В 1905 году при объяснении фотоэффекта Эйнштейн высказал еще идею, что *атом поглощает энергию также квантами*. Квант света был назван впоследствии *фотоном*. Все это вновь обострило дискуссию о природе света, который, с одной стороны, понимался как электромагнитная волна, а, с другой стороны — как поток частиц (фотонов).

Таким образом, к концу XIX века физика пришла к выводу, что материя существует в двух видах: дискретное вещество и непрерывное поле. Вещество и поле различаются по своим физическим характеристикам: вещество — дискретно и состоит из атомов. Частицы вещества обладают массой покоя; поле — непрерывно, массой покоя оно не обладает, скорость его распространения равна скорости света. Пытаясь объяснить особенности теплового излучения, Макс Планк попытался установить закономерность, которая бы четко выражала зависимость распределения энергии в спектре излучения от температуры и длины волн. В результате он вывел формулу для энергии излучаемого фотона $E = h \cdot f$ (f — частота излучения). Величину h Планк назвал *квантом действия*. Она является **фундаментальной постоянной, равной $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж*с**, Поэтому, теорию излучения квантов назвали

квантовой. Для разрешения проблем квантовой теории в 1924 году французский физик Л. Де Бройль выдвинул *идею о волновых свойствах материи*, поясняющую дуализм света как частный случай: *Материя в целом может в одних условиях вести себя как волна, а в других условиях – как поток частиц*. В квантовой теории поля этот принцип расширили на все частицы, а волны частиц стали называть волнами Де Бройля. Следует отметить, что волновые свойства микрочастиц нельзя переносить на макрочастицы. Волновые свойства макроскопических тел экспериментально не обнаружены. Длины волн, соответствующие микрочастицам, находятся за пределами доступной наблюдению области. Поэтому считается, что макроскопические тела проявляют только корпускулярные свойства.

Электромагнитная картина мира

История возникновения:

Известные ещё со времён античности электричество и магнетизм до начала XIX в. считались явлениями, не связанными друг с другом, и рассматривались в разных разделах физики.

В 1785 Шарль Кулон открыл закон притяжения разноименных электрических зарядов между собой. Сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды, пропорциональна их величинам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Она является силой притяжения, если знаки зарядов разные, и силой отталкивания, если эти знаки одинаковы. Таким образом, окончательно было определено наличие зарядов 2-х типов (+ и -), установлена формула для расчета силы их взаимодействия. На основе формулы Кулона был построен математический метод расчета силы электрического поля для распределенного в пространстве заряда. Были проведены эксперименты с металлическими опилками, которые показали расположение в пространстве такого электрического поля, введено понятие силовых линий поля. Таким образом, электрическое поле распространялось на все пространство, но его сила быстро убывала. Был так же обнаружен эффект экранирования электрического поля.

В 1819 г. датский физик Г. Х. Эрстед обнаружил, что проводник, по которому течёт электрический ток, вызывает отклонение стрелки магнитного компаса, расположенного вблизи этого проводника, из чего следовало, что электрические и магнитные явления взаимосвязаны. По аналогии с электрическим было определено

понятие магнитного поля в пространстве и обнаружены его силовые линии.

Французский физик и математик А. Ампер в 1824 г. дал математическое описание взаимодействия проводника тока с магнитным полем (Закон Ампера).

В 1831 г. английский физик М. Фарадей экспериментально обнаружил и дал математическое описание явления электромагнитной индукции — возникновения электродвижущей силы в проводнике, находящемся под действием изменяющегося магнитного поля.

В 1864 г. Дж. Максвелл создаёт теорию электромагнитного поля, согласно которой электрическое и магнитное поля существуют как взаимосвязанные составляющие единого целого — электромагнитного поля. Эта теория с единой точки зрения объясняла результаты всех предшествующих исследований в области электродинамики, и, кроме того, из неё вытекало, что любые изменения электромагнитного поля должны порождать электромагнитные волны, распространяющиеся в диэлектрической среде (в том числе, в пустоте) с конечной скоростью, зависящей от диэлектрической и магнитной проницаемости этой среды. Для вакуума теоретическое значение этой скорости было близко к экспериментальным измерениям скорости света, полученным на тот момент, что позволило Максвеллу высказать предположение (впоследствии подтвердившееся), что свет является одним из проявлений электромагнитных волн.

В 1887 г. немецкий физик Г. Герц поставил эксперимент, полностью подтвердивший теоретические выводы Максвелла. Его экспериментальная установка состояла из находящихся на некотором расстоянии друг от друга передатчика и приёмника электромагнитных волн, и фактически представляла собой исторически первую систему радиосвязи, хотя сам Герц не видел никакого практического применения своего открытия, и рассматривал его исключительно как экспериментальное подтверждение теории Максвелла.

В дальнейшем появление теории относительности и квантовой теории поля дало возможность модернизировать классическую электродинамику — появилась квантовая электродинамика.

Акустика

Параллельно с возникновением волновой теории света эту теорию стали применять к звуковым колебаниям. Так возникла акустика как часть физики. Теорию акустических колебаний и волн разрабатывали позже чем для электромагнитного поля, но по тем же идеям и формулам. Главное отличие оказалось в том, что акустические волны могут быть и продольными и поперечными. В акустике так же есть явления отражения, преломления, интерференции, излучения, дифракции, рассеяния. Но квантовых условий достигнуть не удалось, так как трудно получить длины волн и частоты, где такие явления могут возникать. При этом есть взаимодействие акустических и электромагнитных колебаний (пьезоэффект, электрострикция) и при высоких частотах электромагнитные колебания уже доминируют. Спектр акустических волн : инфразвук (до 100 Гц), слышимый звук (0,1 КГц-30 КГц), ультразвук (> 30КГц). Дальнейшее повышение частоты приводит к гиперзвуку, в котором очень сильно затухание и он возможен лишь в кристаллах, где колеблются отдельные атомы. Здесь уже разница с э/м колебаниями минимальна, возникают тепловые фотоны и используется квантовая теория.

Термодинамика

Вместе с изучением натурфилософии древние ученые определили понятия температура, тепло, нагревание. Были выделены 3 состояния вещества — твердое, жидкое, газообразное. Применительно к воде легко было увидеть, что вода бывает во всех 3 состояниях. Однако до Нового времени количественных законов для тепловых процессов не было. Были некоторые работы Архимеда и других ученых, но настоящей науки не было. С появлением паровых машин появилась необходимость в такой науке.

Развитие научного знания о теплоте началось вместе с изобретением прибора, способного измерять температуру — термометра. Считается, что первые термометры сделал Галилей в конце 16 века. Тогда же научились измерять давление. Первые паровые машины появились во второй половине 18 века и ознаменовали наступление промышленной революции. Учёные и инженеры стали искать способы увеличить их эффективность. Появились работы Карно и Фурье в 20-е годы 19 века.

В 40-х годах 19 века Майер и Джоуль количественно определили связь между механической работой и теплотой и сформулировали

универсальный закон сохранения и превращения энергии. В 50-е годы Клаузиус и Кельвин систематизировали накопленные к тому времени знания и ввели понятия энтропии и абсолютной температуры. Были сформулированы 1-е и 2-е начала термодинамики.

Общее начало термодинамики утверждает, что изолированная термодинамическая система с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия и остаётся в нём сколь угодно долго, если внешние условия сохраняются неизменными.

Первое начало термодинамики выражает универсальный закон сохранения энергии применительно к задачам термодинамики и исключает возможность создания вечного двигателя первого рода, то есть устройства, способного совершать работу без соответствующих затрат энергии.

Второе начало термодинамики задаёт ограничения на направление процессов, которые могут происходить в термодинамических системах, и исключает возможность создания вечного двигателя второго рода. То есть «Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счёт охлаждения теплового резервуара».

Основой работы термодинамических систем является закон Менделеева-Клайперона:

$P \cdot V = k \cdot R \cdot T$, где P — давление, V — объём, k — число молей (определяется числом молекул вещества), R — универсальная константа, T — температура. В целом закон оказался не совсем точен, он работает только для идеального газа, однако он объединил известные на то время процессы в газах (изобарные, изотермические, изохорические), которые описывались отдельными законами. Для реальных газов вводятся уточняющие поправки. В 20 веке для уточнения теории работы термодинамических систем были введены методы статистической физики, затем квантовой термодинамики. В целом на основе классической термодинамики возникли теории твёрдого тела, теория реальных и квантовых газов, термодинамика плазмы и другие. Плазма была выделена как особое 4 состояние вещества, кроме того при очень низких температурах, при очень высоких температурах, при очень высоких давлениях вещество может находиться в таких состояниях, которые могут быть описаны (и то не точно) только с помощью квантовой теории. Кроме того есть еще особая форма твёрдого состояния — кристаллы, которые имеют

уникальные свойства. Затем были обнаружены особые свойства у многокомпонентных и композитных структур. Например нанотрубки обладают невероятными прочностными характеристиками.

Квантовая теория и квантовая картина мира

Для объяснения корпускулярно-волнового дуализма материи было решено ввести особые уравнения квантовой механики (1926— 1927 гг.) Шрёдингера, которые являются аналогом уравнения движения Ньютона для классической частицы. Шрёдингер предложил считать квантовую частицу волновым «солитоном» (сгустком волн). Он считал, что все процессы в микромире являются исключительно волновыми процессами, т.е. что только волны обладают физической реальностью. По его мнению, частица — не что иное, как группа волн, занимающая определенную часть пространства и движущаяся как единое целое. Для описания этой волны вводится волновая функция, описывающая состояние каждой квантовой частицы. Волновая функция занимает все пространство и частица как бы «размазана» по всему пространству. Почему же мы видим частицу в каком-то конкретном месте? Дело в сгущении этой функции или ее разряжении (аналог вероятностной или нечеткой функции/логики). Как только мы пытаемся определить где точно находится частица, мы начинаем взаимодействовать с этой функцией. Таким образом, любое измерение для квантовых объектов приводит к изменению состояния объекта и его функции («кот» Шредингера). Когда квантовых частиц много, они все взаимодействуют друг с другом и итоговая волновая функция перемешивается или «запутывается». Поэтому чистыми квантовыми свойствами обладают только малые объекты — квантовые частицы. Более сложные объекты уже теряют квантовые свойства. Поэтому квантовая механика характерна только для микромира.

Особую роль в создании квантовой теории сыграл Планк. Изучая излучение нагретых тел и пытаясь согласовать экспериментальные особенности спектров излучения с теорией электродинамики Планк выдвинул идею, что обмен между излучением и веществом происходит не непрерывным образом, а дискретными порциями, квантами. При этом количество энергии, сопоставляемое кванту с частотой f (величина, обратная длине волны λ), определяется по формуле $E = hf$ (формула Планка). Здесь где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж*с и есть *постоянная Планка. Физический смысл постоянной Планка состоит в том, что если в классической физике минимальное количество действия может быть любым, то в квантовомеханическом представлении оно не может быть меньше h* . В этих условиях энергия, импульс и момент импульса (а так же спин — некая величина, аналог вращательного момента квантовой частицы) так же будут иметь дискретный спектр значений, т.е., как говорят физики, квантованы. В дальнейшем этот подход был поддержан Бором при

построении своей модели атома и стал краеугольным камнем квантовой теории (почему она и названа квантовой. В 1905 г. Эйнштейн для объяснения фотоэлектрического эффекта также постулировал, что электромагнитное излучение, как и тепловое, имеет квантовый характер и состоит из квантов — фотонов. Напомним, что фотоэлектрический эффект (фотоэффект) — это явление испускания электронов из вещества под действием света. Согласно Эйнштейну кинетическая энергия вылетающего фотоэлектрона равна разности между энергией фотона и минимальной энергией, необходимой для освобождения электрона из вещества, которая называется работой выхода.

Влияние измерения на поведение квантового объекта приводит к тому, что проявление квантового объекта в качестве или частицы, или волны будет зависеть от того, что и как мы измеряем. Поэтому волновой или корпускулярный характер квантовая частица приобретает лишь в глазах экспериментатора. С другой стороны влияние процесса измерения на величины приводит к их неопределенности. Гейзенберг, Паули и Дирак сформулировали теорию квантового измерения и определили так называемые условия неопределенности Гейзенберга — величина энергии, импульса, координата частицы не могут быть измерены точно одновременно (даже теоретически). Точность этого измерения описывается *соотношением неопределенности Гейзенберга*, введенным им в 1927 г.: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$, где h — постоянная Планка. Физический смысл этого соотношения состоит в том, что в природе должен существовать принцип, ограничивающий возможности любых экспериментов (измерений). Применительно к квантовой частице это означает, что изменение импульса частицы Δp и изменение ее координаты Δx определены с точностью до величины кванта минимального действия h . Поэтому физики говорят, что одновременно точно измерить координату, импульс нельзя. Из соотношения неопределенности также следует, что, измеряя сколь угодно точно одну из величин, мы получаем неопределенность в другой, поскольку их произведение равно определенной величине. Таким образом, принцип неопределенности имеет *принципиально вероятностный характер* предсказания событий. Квантовая теория не может предсказать результат отдельного события, однако она с большой точностью дает средние значения для большого числа событий. Мерой вероятности поведения квантовой частицы является введенная Шрёдингером в его уравнении так называемая *волновая функция* ψ , которая используется для вычисления вероятности того, что частицу можно обнаружить в данной точке. Сама функция ψ не имеет прямого физического смысла — это лишь математическая запись возможности (вероятности) определения, но сходная с понятием амплитуды волны. Было показано, что непосредственно измерить ее

нельзя, можно измерить лишь интенсивность (физически она связана с энергией), которая пропорциональна квадрату модуля волновой функции $|\psi|^2$, или плотности вероятности. Таким образом, плотность вероятности $|\psi|^2$ и дает распределение вероятности нахождения частицы в пространстве. Такой способ описания поведения частицы и принцип неопределенности Гейзенберга хорошо согласуются с корпускулярно-волновым дуализмом. Волну нельзя локализовать в пространстве, и поэтому любое измерение поведения частицы, проявляющей и волновые свойства, принципиально связано с неопределенностью. Принцип неопределенности Гейзенберга дает количественное выражение этой неопределенности. Бор в 1928 г. обобщил принцип неопределенности Гейзенберга в своем принципе дополнительности, смысл которого в обобщенной формулировке состоит в том, что получение экспериментальной информации об одних физических параметрах неизбежно приводит к потере других, дополнительных параметров, которые характеризуют это же явление (эффект) с несколько другой стороны. В физическом смысле такими дополнительными друг к другу сущностями, помимо упомянутых координаты и импульса, могут быть волновое и корпускулярное проявления вещества или излучения, энергия и длительность события или измерения. Соотношение неопределенности для энергии и длительности измерения имеет вид: $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$, где $\Delta E = E_2 - E_1$ — разность энергий в два различных момента времени, разделенных промежутком Δt . Современная теория строения атома также основана на квантово-механических представлениях; в частности, используя идею о свойствах электрона, Паули сформулировал принцип, позволяющий объяснить расположение электронов по оболочкам. Результаты и идеи квантовой теории позволили построить новый раздел современной физики — о движении заряженных микрочастиц, учитывая их квантово-механическую природу, — квантовую электродинамику. Огромный вклад в эту физику внес Нобелевский лауреат Р. Фейнман. По существу, здесь рассматривается квантовая природа электромагнитного поля, и поскольку движение заряженных микрочастиц есть всеобщее явление природы, то можно сказать, что квантовая электродинамика описывает все явления физического мира, за исключением гравитации и радиоактивности. Эта теория проверялась в диапазоне размеров от ста диаметров Земли до одной сотой атомного ядра, и точность предсказаний была поистине потрясающей.

Нанотехнологии

Нанотехнология — область фундаментальной и прикладной науки и техники, работающая с объектами с заданной атомной структурой путём манипулирования отдельными атомами и молекулами. 1 нанометр = 0,001 микрометра = 0,000001 миллиметра. Развитие

технологий постоянно требовало повышения точности изготовления деталей, механизмов, систем. Стандарт конца 19 до середины 20 века — микронные технологии. В конце 20 века появление микроэлектроники сделало следующий шаг в направлении 100 нм, 10 нм и т. д. Появились технологии лазерного напыления, сверхчистые материалы и т. д. В конце 20 века появилось понятие нанотехнологии, когда на технологический процесс стали влиять квантовые явления и атомно-молекулярное строение материалов. Примеры : нанороботы, искусственные вирусы, бактерии, наночастицы, наноструктуры.