

Сибирский федеральный университет
Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
Кафедра биофизики

ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКИ

Тексты избранных лекций по дисциплине «История и методология физики» (ДНМ.В.2.) для магистрантов, обучающихся по программам 011200.68.01 – Биофизика; 011200.68.07 – Окружающая среда и человек: основы надзора и контроля.

Разработал – Л.Н.Медведев.

2013

ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКИ – ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ НАУЧНОГО ФИЗИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ

Определение понятия «физика»

Слово «физика» происходит от греческого «физис» - природа. В современном понимании *«Физика - наука о строении материи и о простейших формах ее движения и взаимодействия. Современная физика исследует элементарные частицы, атомные ядра, молекулы, макроскопические агрегаты этих частиц - твердые тела, жидкости и газы, включая плазму, а также поля физические, связывающие частицы вещества в системы»* (Новый политехнический словарь. - М., 2003).

Физика как наука о природе сформировалась лишь в XVII веке. До этого времени физика была частью *натуральной философии*, которая включала в себе всеобъемлющие знания о природе.

Интересна эволюция определения понятия «физика». Этот вопрос обсуждался известным физиком Паулем Эренфестом. Вначале Эренфест привел цитату из учебника физики 1840г. (М. Пулье. Элементы физики): *«...стараться определить какую-нибудь науку, это значит согласиться быть непонятым, потому что наука не может быть определена каким-либо характерным и бросающимся в глаза свойством, как какой-нибудь материальный предмет или геометрическая фигура»*.

Затем он рассмотрел определения физики, которые давались в разные времена. Так, в «Физическом словаре» (1761), составленном иезуитом Rime-Henri Paulianu, говорилось: *«...Эта наука имеет предметом тело в его естественном состоянии, т.е. вещество длинное, широкое и глубокое. Рассматривать, может ли Всемогуций отнять у тела его длину, ширину и глубину, значит желать остановить развитие физики. Мы верим, что Он это может; однако мы воздержимся заниматься таким вопросом, как физика. Тело, лишенное своих трех измерений и сохранившее только требование протяженности, было бы скорее объектом метафизики, нежели физики»*.

Более поздние определения физики:

1. *Физика есть наука о существе, свойствах, силах, действиях и цели всех видимых в свете тел. Как называются особенные части физики? Соматология, стихиология, метеорология, минералогия, химия, зоология и телеология»* (Энциклопедия, или Краткое начертание наук и всех частей учености. Переведена с немецкого на русский И. Шуваловым. - М., 1781).

2. *«Физика... Природознание, естествознание; наука, составляющая часть философии, имеющая своим предметом природу вообще и всех естественных тел, их*

свойств, явлений и взаимного друг на друга действия» (Новый истолкователь / Составил Н. Яновский. -СПб., 1806).

3.«Физика,... наука или учение о природе, в настоящее время учение о законах явлений, происходящих в неодушевленной природе, помимо химических превращений, происходящих в телах» (Большая энциклопедия/Под ред. С. Южакова. - СПб., 1905).

4.«Физика... Основная наука естествознания о формах движения материи, ее свойствах и о явлениях неорганической природы» (Толковый словарь русского языка / Под ред. Д.Н. Ушакова. Т. 4. -М, 1940).

5.«Физика, наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, и законы ее движения. Понятия физики и ее законы лежат в основе всего естествознания. Физика относится к точным наукам и изучает количественные закономерности явлений» (Большой энциклопедический словарь. ФИЗИКА. - М., 1998).

Цель и задачи дисциплины

Первый вопрос, который возникает при составлении программы учебной дисциплины – это ее предназначение. Этот же вопрос при изучении учебного курса возникает и у студентов. Кажется, что ответы лежат на поверхности. Первый, банальный ответ звучит так: каждый университетски образованный физик должен знать историю и, тем более методологию своей науки. В равной мере это должно относиться и к биофизикам, так как биологический объект изучается в биофизике с позиции физических законов, а не наоборот. Однако на самом деле все не так очевидно и просто.

Дело в том, что история может быть написана с различных точек зрения при полном сохранении достоверности события и факта, история науки не исключение и допускает различные точки зрения (М.Лауэ, 1956). Это замечание выдающегося физика первой половины XX века практически подтверждается анализом учебных программ, предлагаемых разными университетами России.

Физика, как и наука в целом, представляет собой общественное явление и имеет свои объективные законы развития. Конечно, эти законы определяют только общие тенденции развития, но, тем не менее, появляется реальная возможность предвидеть целый ряд особенностей дальнейшего хода развития данной науки и использовать эти знания с определенными целями. Для физики это особенно важно, поскольку темп исследований в физике, начиная с 19 века неуклонно возрастает, также как и затраты на масштабные физические проекты – большой адронный коллайдер, токамак и другие.

Понятие закона или закономерности развития науки вообще, физика здесь не исключение, очень широкое. В порядке перечисления это:

1.общие закономерности развития физики, обусловленные социально-экономической ролью в жизни общества, связью с общественными институтами;

- 2.закономерности, определяемые предметом науки и свойствами познания, т.е. внутренняя логика развития науки;
- 3.закономерности психологии научного творчества;
- 4.закономерности организации науки, ее планирования, вопросы научной информации.

Главная же общая закономерность развития физики как науки – потребности общественно-исторической практики.

Поэтому не вызывает удивления, что в одних курсах история физики простирается буквально до наших дней. Хотя новейший этап развития физики весьма спорно включать собственно в историю, ведь история науки, по мнению многих историков науки должна доходить только до тех проблем, которые в настоящее время еще не могут быть признаны решенными. Это обстоятельство является самоочевидным, когда студенты параллельно изучают специальный курс «Проблемы современной физики» или близкий к нему.

В других отводится много учебного времени на ранний, подготовительный этап развития физики, т.е. на физику древности (Древняя Греция и Древний Рим), эпоху средневековья (Роджер Бэкон, Жан Буридан и другие) и эпоху возрождения (Леонардо да Винчи, Иероним Кардан, Вильям Гильберт, Галилей, Ньютон).

В третьих много внимания уделяется методологии науки вообще и физики в частности. Однако у магистрантов могут быть отдельные курсы «Философия науки» и «Методология научного творчества» («Методология науки»). Разумеется, «повторение мать учения», но тогда методология науки должна быть вынесена на самостоятельное повторение.

Наконец существуют университетские курсы, в которых автор предлагает проследить неформальные связи физики с философией, религией, психологией и вообще с гуманитарной культурой (Роках А.Г., Саратов, 2007). Такой подход вполне оправдан для понимания места физики в культуре, но он может быть реализован только после изучения основ научной методологии. В противном случае может сложиться впечатление, что религиозные убеждения творцов физики и законы физики это нечто равноценное, неотделимое друг от друга.

Поэтому формализовано краткий ответ на вопрос о предназначении данной учебной дисциплины может звучать следующим образом.

Цель изучения дисциплины «История и методология физики» состоит в том, чтобы опираясь на базовый цикл естественно-научных дисциплин, обеспечить формирование представления о физике и методах научного познания в историческом аспекте ее развития. Для реализации цели предусматривается освещение следующих задач:

- раскрытие истории возникновения и развития фундаментальных идей, понятий, законов, принципов и концепций физической науки;
- углубление, обобщение и систематизация знаний студентов по физике.
- формирование у будущих выпускников физической картины мира.

Преимственность в развитии физики

В истории физики, равно как и в истории любых наук, исследователи стремятся, прежде всего, понять истоки и динамику развития основ науки, а не просто в хронологическом порядке перечислить факты. Здесь главное – понять, как, на каких идеях возникали те или иные законы, вопросы же приоритета существенной роли не играют. При обращении к естественно-научному знанию приобретает значение методология, с помощью которой добывалось новое знание. Для физики особое значение имели два подхода – *эмпирический* и *теоретический*. Понимание закономерностей развития физических идей неотделимо от представлений философски-научного характера об *эволюционном* и *революционном* формировании физического знания и научной картины мира. Здесь принципиальное значение приобретают достижения древних ученых-философов: Архимеда, Пифагора, Платона, Аристотеля и других мыслителей того времени. В средние века схоласты широко использовали учение Аристотеля, правда они изъяли из него все рациональное, оставив только то, что устраивало их философский подход миропонимания. Эстафета по формированию научной картины мира после очень длинного перерыва затем была подхвачена учеными Нового времени: Коперником, Галилеем и другими.

Поэтому обращение к тому времени, когда зарождались первые научные методы, понятия и теории, к людям, участвовавшим в становлении древней науки, в первую очередь греческой, не нуждается в особом обосновании. Общепризнано, что феномен науки раскрывается в ее истории, особенно в периоды быстрого роста или даже взлета научного знания. С этой точки зрения наибольшего внимания заслуживают два периода: VI— IV вв. до н. э. – эпоха зарождения науки, и XVI—XVII вв. – время великой научной революции, сформировавшей науку Нового времени.

Мы не будем детально заниматься слишком далеким прошлым. Конечно, уже у шумеров, вавилонян и египтян по отдельным вопросам физики были ценные знания, которые, однако, производят впечатление чего-то случайного, несистематического, непродуманного. Из тех областей знания, которым мы будем уделять внимание, собственно только статика, часть механики, начала развиваться еще в греко-римской древности. Из некоторых дошедших до нас высказываний Платона (427—347 до н. э.) мы узнаем о совершенном пренебрежении ко всякому эмпирическому исследованию. При этом следует учитывать, что это было отношение именно Платона, на этом основании считать, что все древние ученые так относились к эмпирическому знанию нельзя, поскольку это противоречит фактам. Поэтому именно у Платона любые попытки «осквернить» возвышенную науку – математику – применением ее за пределами области чистых идей встречали резкое порицание. Именно с этим связано то, что Аристотель (384—322 до н. э.) в своей величественной системе науки дал в области естествознания логический или чаще только софистический (ложный по существу, формально кажущийся правильным) анализ понятий, довольно некритически выведенных из поверхностно установленных фактов.

Нельзя назвать ни одной научной отрасли — будь то математика, астрономия, механика, оптика, биология или медицина, — в которой ученые Нового времени не

стояли бы на фундаменте, заложенном греками. Их отношение к греческой науке было различным: не было недостатка ни в слепом преклонении, ни в яростной критике. Но и в том и в другом случае укорененность их идей в научном наследии античности несомненна. Признавая эту преемственность, многие подчеркивают, что знания, полученные от греков, были во многом переосмыслены и включены в иную теоретическую систему. Однако отрицает ли это научный характер унаследованных знаний? Развиваясь, наука не может всегда и во всем оставаться равной самой себе, но и новые качества, приобретаемые ею в процессе развития, не могут изменить ее сущность до неузнаваемости.

Большинство методологов науки считает, что ее важнейшей конституирующей чертой является *гипотетико-дедуктивный метод*. В практике историко-научных исследований этот критерий позволяет с большой точностью определить время и место зарождения науки: VI в. до н. э., ионийские города Древней Греции. Именно в среде греческих астрономов и математиков того времени впервые начинают систематически применяться научная гипотеза и дедуктивное доказательство, ставшие главными орудиями в приобретении знаний. В предшествующих восточных культурах эти важнейшие компоненты отсутствовали, что же касается европейской науки, то она не создала никаких принципиально новых методов научного познания.

Взгляд на древнегреческую науку, как исключительно спекулятивную, не опирающуюся на наблюдения и эксперименты, мало соответствует действительности – у древних греков были эксперименты и наблюдения. Именно они легли в основу акустики, оптики, механики, ботаники, анатомии, физиологии, географии, астрономии. Конечно, в познании у древних греков главенствовал логический подход. *Только в Новом времени была понята и взята за основу фундаментальная роль эмпирического подхода в естествознании.*

Эволюционное и революционное развитие физики

Физика как наука характеризуется особым типом закономерности развития. Эта особенность состоит в том, что развитие физики есть процесс чередования относительно спокойных периодов – *эволюционных* – и периодов *революционных изменений* теорий, понятий, основных принципов. Эволюционные и революционные периоды в физике прослеживаются легко. Причем это относится к развитию ее отдельных областей и даже теорий, а не только ко всему зданию физики. В эволюционный период развитие идет спокойно, следуя уже сложившимся общим взглядам физиков. В это время господствуют определенные традиции, определенная методология, даже методика исследований. Большинство ученых находится под влиянием общей научной атмосферы, следуя определенной парадигме. В это время уже установленные основные принципы распространяются на различные конкретные вопросы, уточняются частные закономерности, основные принципы приобретают законченный, совершенный вид. Однако проходит некоторое время накапливается то, что называется *пассионарностью*, т.е. накопление недовольства старым багажом знаний и острое понимание необходимости новизны. Появляются *пассионарии* –

ученые, у которых возникли новые идеи и теории. Эволюционное развитие заканчивается, начинается крушение прежних принципов, устанавливаются новые взгляды, новые представления и теории. Потом революционные преобразования заканчиваются, наступает новый, эволюционный период развития. Именно так развивалась оптика. После Ньютона господствующей стала корпускулярная теория света, хотя некоторые ученые – Ломоносов и Эйлер – придерживались представлений о волновой природе света. В рамках корпускулярной теории оптика развивалась весь 18 век. Но в первой половине 19 века произошел революционный переворот в оптике: на смену корпускулярной пришла волновая теория света. При этом изменилось основное представление о природе света, встали вопросы исследований интерференции, дифракции и другие. То же произошло и с учением о теплоте: теплородная теория была заменена кинетической, основу которой составляли иные представления.

Физика и общество

Физика не оставалась и не остается чуждой жизни. Оказывая непосредственное влияние своими техническими применениями, она не менее сильно влияла на жизнь, как отдельных людей, так и народов своими идеями, в силу чего политическая история также не может быть понята без этих влияний. Не будет преувеличением утверждение, что мыслительная работа физиков за три или три с половиной столетия глубоко проникла в духовное формирование современных людей.

Если церковь в общем уже давно стала воздерживаться от вмешательства в дела физики, то все же на деятельность физиков всегда влияли их религиозные взгляды, правда, часто не идентичные с официальным учением церкви, а скорее философски обоснованные. Это выражено у Кеплера, Декарта, Лейбница, Ньютона, это играет роль в принципе наименьшего действия в XVIII столетии. С тех пор как философия Канта объявила полную независимость научного познания от религиозной веры, больше об этом в сочинениях по физике, пожалуй, ничего не найдется. Отсюда никоим образом не следует, что склонность к исследованию у позже живших естествоиспытателей не была связана с их религиозностью. Положение о том, что научное переживание истины есть в каком-то смысле «видение бога», высказывалось искренно даже лучшими из них. Стремление к познанию независимо от его применимости, его пользы, является основной чертой человека в течение тысячелетий, признаком его высшего происхождения.

О связи между развитием общества и развитием физики свидетельствует пример с идеями Ньютона. В 18 веке они широко распространились во Франции в широких слоях общества, а не только среди специалистов. Распространению способствовал особенно Вольтер. Это пример развития физики на общее духовное развитие и поэтому также на политику.

Взаимосвязь развития физики с техникой и развитием других наук

Физика всегда имела тесный контакт с соседними науками: астрономией, химией, минералогией. Границы между этими науками определяются только довольно

внешними различиями, прежде всего различием аппарата, и поэтому они часто перемещаются. В XVII столетии, а также позднее физик, химик и астроном нередко объединялись в одном лице. Роберт Бойль (1627—1691) и Эдм Мариотт (1620—1684), были прежде всего химиками. То же относится к Генри Кавендишу (1731—1810), Антуану Лорану Лавуазье (1743—1794) и Гемфри Дэви (1778—1829). В создании понятия атома физика и химия участвовали в равной мере. В конце XIX столетия, благодаря исследованиям Сванте Аррениуса (1859—1927), Якоба Вант-Гоффа (1852—1911), Вильгельма Оствальда (1853—1932) и Вальтера Нернста (1864—1941), возникла как отдельная наука *физическая химия*. В XX веке возникла новая научная отрасль *химическая физика*, в этот же период оформилась *биофизика*. В XX столетии физики после долгого перерыва начали опять интересоваться теорией кристаллов, которая до тех пор была в ведении минералогов.

Еще теснее связь между физикой и математикой. Математика в полном смысле стала интеллектуальным орудием физика. Ведь только она дает возможность точного научного выражения познанных законов природы и их применения к сложным процессам. Считается, что закладка к 1700 году физического фундамента, на котором в последующие полтора столетия было воздвигнуто величественное здание механики, связано с тем, что она развивалась преимущественно математиками. Логарифмы, например, которые вскоре после 1600 г. были открыты Иобстом Бюрги (1552—1632) и независимо от него бароном Джоном Непером (1550—1617) и Генри Бриггсом (1556—1630), были впервые применены в астрономических вычислениях Кеплера. Последующие успехи физики, а именно в механике, были теснейшим образом связаны с одновременными успехами в математике. И наоборот, часто постановка физических вопросов обуславливала прогресс математики.

Своеобразно отношение физики к философии. В начале Нового времени в физике трудились люди, которые известны прежде всего как философы: Декарт, который, конечно, принципиально отклонял галилееву методику исследования, или Лейбниц. Кант также выступил как естествоиспытатель; наиболее известными и значительными его достижениями в физике являются космологические идеи о возникновении планетной системы. Позднее происходило скорее наоборот: физики и химики выступали с философскими сочинениями, например Гельмгольц, Мах, Пуанкаре, большей частью по вопросам теории познания, которая из всех философских дисциплин наиболее близка физике. Вне всякого сомнения, успехи естествознания оказывали сильное воздействие на всех выдающихся философов. Наиболее известный пример — влияние Ньютона на Канта. В XIX столетии возникла вполне обоснованная оппозиция естествоиспытателей против «философии тождества» Гегеля, отказывающей в праве на существование любой опытной науке, — оппозиция, которая, к сожалению, часто распространялась на всю философию и даже на любую теорию в естествознании. Например, Роберт Майер испытал это на себе из-за умозрительного уклона в своих сочинениях, и даже против знаменитого произведения Гельмгольца «О сохранении силы» поднимались вначале подобные упреки.

На протяжении всей истории физики видна ее связь с техникой. Разработка Гюйгенсом теории маятника, имела значение для развития механики, происходила под

влиянием задачи конструирования часов. Практическая задача усовершенствования паровых машин (Джеймс Уатт, 1770) привела к формулировке теоремы Карно, явившейся отправным пунктом развития термодинамики. Ядерная физика по настоящему стала развиваться после того, как стала определенной практическая задача овладения внутриядерной энергией. Эта связь со временем расширялась и углублялась, изменялся характер связи. Примерно до середины 19 века потребности техники стимулировали развитие физики. Особенно ярко это видно на примере термодинамики: вначале изобретена паровая машина, а потом, начиная с Карно, развивается термодинамика. Но с середины 19 века все чаще связь изменяет характер – появление отраслей техники становится итогом открытий в физической науке. Например, открытия в области электродинамики в первой половине 19 века привели к мысли о создании телеграфа, и появляется новая отрасль техники – техника слабых токов, а затем и электроэнергетика. Открытия в области физики атома и ядра вызывали к жизни атомную и ядерную энергетику.

Одновременно с укреплением связи между физикой и техникой физика все более приобретает самостоятельность, т.е. развивается из внутренних потребностей предмета исследования. Имеется в виду, что появляется все больше «чистой» или фундаментальной науки пока или в обозримом будущем вообще не связанной с практикой. Например, это формирование физических космологических представлений – теория большого взрыва, теория пространства и времени – Хокинг. Кроме того, техника во все возрастающей мере расширяет экспериментальные возможности физики. Создание современного физического института было бы совершенно невозможно без широкой помощи техники.

Два уровня физики

Методология науки вообще, физике, в частности, рассматривает общую структуру, подходы, принципы и общенаучные методы таким образом, что воедино сливается вся наука, т.е. как бы исчезает отдельное открытие, отдельный человек и даже целый коллектив. Тогда как понятно, что в любой отрасли науки существуют два уровня. На одном совершается будничная исследовательская работа. На втором происходит обобщение отдельных фактов, небольших достижений – возникают теории, законы.

Подобно тому, как история народов и государств отмечает только более значительные события и выдающихся людей, история науки рассматривает лишь вершины исследования и рассказывает о тех, кто участвовал в их создании. В тени остаются тысячи людей, пришедших в физику с начала XVII века и из чисто идеальных побуждений посвятивших себя ей иногда до самопожертвования. Но их деятельность не была лишней или напрасной. Только совместная работа многих ученых обеспечила необходимую полноту наблюдений и вычислений и непрерывность прогресса; только разнообразие интересов и дарований помешало тому, чтобы исследование протекало в немногих определенных направлениях; их деятельность была и остается необходимой предпосылкой для появления выдающихся

или даже гениальных открытий. Физика, по крайней мере, с конца XVII столетия, является плодом коллективной работы. Это – также исторический факт.

МЕТОДЫ ПОЗНАНИЯ В ФИЗИКЕ И ИХ СТРУКТУРА

Определение понятия «наука»

Для правильного, т.е. объективного понимания истории развития физики, появления основополагающих законов и принципов, отхода от одних представлений о физическом устройстве реального мира и формирования других необходимо иметь точку отсчета. Такой отправной точкой или точнее позицией является однозначность понимания вида деятельности, который называется *научной*. В свою очередь желательно определиться с датой возникновения науки вообще и физики в частности. Для истории физики принципиальное значение имеет вопрос об основных методах научного познания, о структуре методов эмпирического и теоретического исследования.

Вначале под наукой понимали знание вообще и тем самым её появление расставили на протяжении всей человеческой истории:

1. Наука возникла с появлением человеческого общества.
2. Начало науки относится к 7-му тысячелетию до н.э., т.е. ко времени перехода человеческого общества к так называемой неолитической экономике.
3. Исходным положением науки следует считать знание, возникшее в древних цивилизациях Востока (Китай, Египет, Вавилон, Индия).
4. Возникновение науки датируется 4-6 в.в. до новой эры (Древняя Греция).
5. Появление науки связано с возникновением эксперимента и точного знания, т.е. в 15-16 в.в., т.е. относится к Новому времени.
6. Истинная наука возникла в 19 веке.

Надо обратить внимание на тот факт, что далеко не всякое знание является научным. Первое условие, которое делает знание научным – рационализм. Из исторически унаследованной суммы знаний должны быть исключены иррациональные элементы и структуры, принципиально не свойственные науке.

Однако возникновение научных дисциплин не объяснить только накоплением и рационализацией практических знаний. Наука возникла как целостное явление в единстве научного знания, научной деятельности и их организации. *Поэтому можно утверждать, что истинная наука возникает с началом профессионализации научной деятельности и образованием её социальной организации.* Следовательно, о возникновении науки в ее современном понимании можно говорить, только начиная с периода Нового времени.

Таким образом, сущность целостной науки выражается в единстве трёх необходимых и достаточных подсистем, определяемых следующими понятиями:

1. Наука – подсистема исторически развивающегося достоверного (истинного) знания, отражающего реальность в знаковых формах.
2. Наука – подсистема специфической социальной деятельности профессионально подготовленных субъектов (учёных и научных коллективов), направленной на получение научного знания средствами особой методологии.
3. Наука – подсистема организационных форм (академий, институтов, лабораторий, обсерваторий, полигонов и т.п.).

Обобщая эти основные признаки науки в целое и делая упор на социальную сторону, можно опереться на следующее определение науки. *Наука – это особый вид социальной деятельности и её организации, целью которых является отражение реальности в системе достоверного (истинного) знания, выраженное в знаковых формах естественных и искусственных языков.*

Завершающий этап формирования истинной науки выражается в образовании академических научных учреждений: Лондонского королевского общества, 1662; Французской королевской академии наук, 1662; Прусской академии наук, 1700; Петербургской академии наук, 1724; Американской академии наук, 1780 и других академических научных учреждений.

В литературе по истории науки, включая историю физики, постоянно используется термин «ученый» по отношению к тем, кто занимался деятельностью, называемой сегодня научной. Однако следует учитывать, что это название эти люди по отношению к себе стали проявлять только с середины 19 века. В 1840 году английский учёный В. Вевелл в своей «Философии индуктивных наук» в качестве некоторого подведения итогов писал: «Нам крайне нужно подобрать название для описания занимающегося наукой вообще. Я склонен называть его Учёным». Формирующееся сообщество учёных постепенно создаёт научные коммуникации, вырабатывает типичные образцы «технологии» (методологии) научных исследований, идеалы и нормы систематизации научных знаний, устанавливает неписанные социально-этические кодексы научного взаимодействия.

Метод науки и научный метод

Каким же способом социальный институт науки добывает научное знание? Вопрос не риторический и, более того, приближает нас к практической стороне функционирования науки и научного сообщества.

Метод (с греч. - *methodos*) - в широком смысле обозначает путь к чему-либо, способ исследования, обучения, изложения. Любое «действие по методу» предполагает постановку цели и планомерное, последовательное ее достижение рядом действий. Наиболее эффективным «действием по методу» становится в том случае, когда в его основе лежат законы исследуемого или преобразуемого объекта, вскрытые в предшествующем опыте практической и теоретической деятельности.

Метод науки – это выработанная научным сообществом сбалансированная система эмпирического и теоретического уровней исследования, позволяющая операционально, последовательно и поэтапно получать и обобщать новое научное знание от фактов до законов и теорий.

В наиболее общем виде *содержание и структуру* метода науки можно как вариант представить следующими основными взаимоподчиненными этапами:

1. Анализ проблемной ситуации, выдвижение проблемного замысла, обоснование и формулировка проблемы, конкретизация проблемы в задачах.
2. Выдвижение первичного предположения, рабочей и развернутой гипотезы.
3. Обоснование гипотезы путем установления ее эмпирической проверяемости, теоретической обоснованности, логической состоятельности, истинности и достоверности.
4. Разработка программы экспериментального исследования, выбор процедур и технических средств.
5. Проведение опытных исследований, сбор и обработка данных наблюдения и измерений.
6. Сравнение эмпирических данных с содержанием предлагаемой гипотезы, ее принятие, доработка или отбрасывание.
7. Формулирование нерешенных задач и новой научной проблемы (подпроблемы).

Исследовательские этапы сопровождаются применением научных методов. Содержание научного метода зависит как от характера исследуемого предмета, поставленных задач, так и от специфики этапа. В начале познания (при постановке проблемы, при выборе исходных данных, сборе информации) в роли метода выступает принцип, руководящая идея. Когда же исследователь непосредственно приступает к анализу своего предмета, в роли метода выступают познавательные процедуры, методика исследований.

Научный метод - это система принципов и императивов, операций и процедур, правил и норм, обеспечивающая в научном исследовании генерацию нового знания, его проверку и подтверждение в процессе решения познавательных проблем и задач.

В формулировке научного метода приняты термины и понятия: *принцип* - основополагающее первоначало, основное положение, исходный пункт, предпосылка теории или концепции; *императив* - настоятельное требование, конкретизирующее принцип; *операция* - относительно законченное исследовательское действие при решении поставленной задачи; *процедура* - связанная и упорядоченная совокупность операций; *норма* - общепризнанная в научной среде совокупность требований, регулирующих познавательные акты.

Научный метод считается состоятельным при условии выполнения им ряда общих требований. Наиболее значимые *требования к методу* можно обобщить и представить в следующей последовательности:

1. *Детерминированность метода*, т.е. его обусловленность закономерностями

объекта, познавательной деятельности и теоретических знаний, реализованных в нормативных средствах управления методом.

2. *Заданность метода целью исследования*, что вытекает из обусловленности метода закономерностями познавательной деятельности. Требование распространяется на все компоненты метода и подчеркивает активность исследователя.

3. *Результативность и надежность метода*: его разрешающая способность должна однозначно давать результаты с высокой степенью вероятности. Надежность зависит от каждого компонента метода и их структурной компоновки в системе метода.

4. *Экономичность метода*: затраты на его создание и использование должны быть всегда меньше величины, окупаемой результатами исследований, что обусловлено кадровыми, экономическими и социально-организационными факторами.

5. *Ясность и эффективная распознаваемость метода*: метод должен быть выражен в общезначимых терминах и понятиях и доступен любому подготовленному исследователю.

6. *Воспроизводимость метода*: возможность использования метода неограниченное число раз, включая и все его компоненты.

7. *Обучаемость методу*: в метод разрешается включать все то, чему можно обучить. Основой требования являются воспроизводимость и распознаваемость метода.

Общенаучные методы

К общенаучным методам операциям, приемам, процедурам или просто методам, использующимся на эмпирическом и теоретическом уровнях научного исследования, относят: *абстрагирование, определение, анализ и синтез, индукцию и дедукцию, классификацию, аналогию, моделирование, обобщение, научное объяснение.*

Все эти приемы используются в физике – иногда ученый применяет их в неявном виде, т.е. специально называет процедуру, которой пользовался при выведении положения, теории, закона.

Для примера остановимся на двух процедурах, имеющих широкое распространение в физике едва ли не всех этапах ее развития – *анalogии и моделировании.*

Метод аналогий

Метод использования аналогий можно считать закономерностью развития физики. История свидетельствует о его огромном значении в построении новых теорий, начиная с первых шагов развития физики вплоть до современности. Например, вся геометрическая оптика строилась на аналогии между пучком летящих частиц и световым лучом. В основу волновой оптики была положена аналогия между

световыми волнами и волнами на воде, а затем и волнами в сплошной упругой среде. Электростатика и учение о магнетизме строились по аналогии с теорией гравитационного поля. Общеизвестно, что при построении квантовой механики де Бройль и Шредингер использовали оптико-механическую аналогию, открытую еще Гамильтоном. Гейзенберг открыто использовал аналогию между классическим и квантовым рассмотрением. Один из основателей квантовой механики Дирак писал: *«...существует довольно общий метод квантовых условий, применимый к очень широкому классу динамических систем - это метод классической аналогии... мы должны ожидать, что важные понятия классической механики будут соответствовать важным понятиям квантовой механики... В частности, можно надеяться получить квантовые условия, являющиеся простым обобщением классического закона, согласно которому все динамические переменные коммутируют»*.

Метод моделирования

Он широко применялся в физике с начала ее возникновения. Однако понятие модели и характер применяемых типов моделей изменялись вместе с развитием физики. С известной условностью выделяют четыре типа физических моделей: макромодели, микромодели, математические или знаковые модели, квантовые модели.

Макромодель – это упрощенный абстрактный образ макрообъекта: материальная точка, твердое тело, идеальная жидкость, математический маятник.

Микромодель – это модели, в основе которых лежит представление о существовании ненаблюдаемых непосредственно субстанций или объектов. В классической физике это были атомы, молекулы, эфиры и др. Считается, что без модельных представлений эфира Максвелл не смог бы прийти к теории электромагнитного поля.

Математическая или знаковая модель. Это изображения структуры электромагнитного поля с помощью системы силовых линий и эквипотенциальных поверхностей; графики, выражающие зависимости между физическими величинами, например, представляющие адиабатический процесс; образ точки в фазовом пространстве, представляющий нагретое тело и др.

Квантовые модели. Квантовая модель дает образ квантового микрообъекта, так же как микромодель представляет образ микрообъекта в классической физике. Однако поскольку объект обладает квантовыми свойствами его цельный образ построить нельзя, можно только одну из сторон квантового микрообъекта. Простейший пример – электрон. В одном случае – это материальная точка с зарядом, в другом – непрерывно распределенное поле. Это не просто разные модели одного объекта, а модели, взаимно исключающие друг друга.

Методы теоретического исследования

Методология теоретического исследования включает в себя *общенаучные подходы* и *общенаучные методы*. Вместе с этим, в теоретических исследованиях используют специфические приемы (методы): *идеализация, мысленный эксперимент, метод гипотез, гипотетико-дедуктивный и аксиоматический методы, формализация и др.*

Идеализация

Идеализация – вид абстрагирования, обеспечивающий мысленное конструирование предельно абстрактных объектов, наделенных минимальным числом сущностных свойств, необходимых для решения задач теоретического исследования.

Идеализация является первой стадией теоретического исследования. Цель идеализации – создать конструкцию для мысленного эксперимента.

Строго говоря, идеализация уже присутствует и в эмпирическом исследовании. Как известно, во многих случаях проведение эксперимента, особенно лабораторного, осуществляется так, чтобы минимизировать *влияние приборов, внешней среды и исследователя*. Часто прибегают к *изоляции* предмета исследования, например, от электромагнитных излучений, иначе говоря, исследователь создаёт *идеальные условия для изучения предмета*, которые реально не встречаются.

Продуктом идеализации являются идеальные объекты, которые не существуют в реальности и вообще практически неосуществимы. Таковыми объектами, например, являются: точка, прямая линия, плоскость, абсолютное пространство и абсолютное время, математический маятник, материальная точка, идеальный газ, несжимаемая жидкость, абсолютно твердое тело, абсолютно упругий удар, абсолютно черное тело, точечный электрический заряд, магнитное поле в точке, идеально правильный кристалл.

При формировании идеальных объектов исследователь ставит перед собой две цели: во-первых, лишить реальные объекты некоторых присущих им свойств; во-вторых, мысленно наделить эти объекты определенными гипотетическими, нереальными свойствами, необходимыми для решения поставленных теоретических задач.

Итак, идеализация и идеализированные объекты - важнейшее средство теоретического исследования. Они необходимы при разработке *мысленных экспериментов*, обосновывающих принципы и гипотезы будущей теории. Вместе с этим идеализированные объекты входят в содержание теории, основные положения которой отражают свойства не реальных, а идеализированных предметов.

Мысленный эксперимент

Мысленный эксперимент – метод теоретического исследования идеализированных объектов, образующих модели реальности. Ставя такие объекты в разные отношения, доводя их количественные характеристики до крайних логически возможных значений, устанавливаются существенные связи и закономерности, недоступные при изучении реальных объектов.

В исторически важном мысленном эксперименте С. Карно установил «принцип Карно», исследуя идеальную паровую машину. Уподобляя теплород воде, а разность температур разности уровней воды, Карно заключил, что как при падении воды работа измеряется произведением веса воды на разность уровней, так и в паровой машине работа независимо от природы рабочего вещества (вода, спирт) измеряется произведением количества теплорода на разность температур. Иными словами, отдача тепловой машины ограничена значениями температур нагревателя и холодильника. Как подчеркивает Карно, холодильник – столь же необходимый элемент, как и котел, причем если в машине не предусмотрен специальный охлаждающий элемент, то его роль играет окружающая среда. Все это и представляет собой суть «принципа Карно», или второго начала термодинамики, как он стал называться позже, после того как этому разделу физики было придано аксиоматическое построение. Это был именно мысленный эксперимент, так как Карно отбросил разные побочные процессы и оставил только сущностно главное.

Мысленные эксперименты и модели сопровождают всю современную науку, отображая и замещая реально существующие сложные объекты исследования. Непрерывно создаваемые первоначальные модели постепенно дополняются и детализируются. Таковы, например, в той же физике первоначальные модели атомов и молекул, модели газов, волновая и корпускулярная модели света, модели атомного ядра - капельная, коллективная, оболочечная, однонуклонная и другие.

Гипотетико-дедуктивный метод

Гипотетико-дедуктивный метод – это метод анализа и построения эмпирических теорий в форме иерархии гипотез.

В основе этого метода лежит *метод гипотез*. Гипотеза как метод включает в себя два этапа: во-первых, выдвижение и обоснование гипотезы; Во-вторых, ее *экспериментальная проверка* и обобщение знания в теоретическое положение.

В зависимости от наличия эмпирического и теоретического обоснования выделяют: необоснованные гипотезы, эмпирически обоснованные гипотезы, теоретически обоснованные гипотезы и полно обоснованные гипотезы.

Необоснованные гипотезы (гипотезы-догадки) не связаны ни с предшествующим знанием, ни с опытом. Естественно, такая связь существует, поскольку сознание исследователя может оперировать только наличной информацией, предшествующим знанием. Однако здесь отсутствует сознательное обоснование.

Доминирование этого типа гипотез характерно для созерцательного знания и для вновь формирующихся теоретических дисциплин.

Эмпирически обоснованные гипотезы связаны не с наличным знанием, а с эмпирическими данными. Если в научной дисциплине доминируют эмпирически обоснованные гипотезы, то по объекту исследования и по способам обоснования ее квалифицируют эмпирической наукой.

Теоретически обоснованные гипотезы противоположны эмпирически обоснованным в том смысле, что методы обоснования связывают не гипотезы и опытные данные, а гипотезы и ранее имевшееся знание. Теоретически обоснованная гипотеза - это предположение, не прошедшее эмпирической проверки, выделенное из наличного знания и направляющее будущие эксперименты.

Полно обоснованные гипотезы методически согласуются не только с наличным знанием, но и с данными опыта. Преобладание такого рода гипотез характерно для теоретического естествознания и является признаком того, что наука сформировалась. Среди этих гипотез выделяются законы науки. Если эти законы-гипотезы носят признаки общности и системности, служат исходными допущениями для других утверждений, то их называют принципами.

Некоторая формирующаяся наука, которую часто называют описательной, постепенно накапливает *множество изолированных фактов, обобщений и гипотез*. Однако в научном познании стремятся иметь дело не с изолированными гипотезами, а с определенной их *системой*. Поэтому пытаются вначале выделить важнейшие обобщения и факты, основные гипотезы, установить между ними дедуктивные отношения. Далее создается гипотетическая модель или абстрактно-теоретическая схема объекта исследования, которая разворачивается в систему гипотез.

Гипотетико-дедуктивный метод демонстрирует процесс *становления, развития формирующейся науки*, где движение идет от фактов через иерархию гипотез к новым фактам с соответствующей корректировкой некоторых гипотез и новых исследований. В развитых, *стабилизированных* дисциплинах, например, точного естествознания (механика, оптика, электродинамика, теория относительности, космология и др.) преобладает *аксиоматический способ построения теорий*.

Метод аксиоматизации

Аксиоматизация - метод дедуктивного построения теории некоторой научной дисциплины или ее раздела, когда ряд утверждений принимается без доказательств (аксиомы или постулаты), а все остальное знание (леммы, теоремы, законы и др.) выводятся из них по определенным логическим правилам.

Аксиоматический метод впервые был успешно применен Евклидом для построения элементарной геометрии. В системе аксиом евклидовой геометрии за *основные понятия* приняты точка, прямая, плоскость, движение и *отношения*: точка лежит на прямой или на плоскости, точка лежит между двумя другими. Эта *система*

аксиом состоит из *пяти групп*: аксиомы сочетания, аксиомы порядка, аксиомы движения, аксиомы непрерывности, аксиомы параллельности.

Метод формализации

Формализация - метод теоретического исследования некоторой предметной области посредством отображения ее содержания в знаковых формах искусственных специализированных языков, целевого оперирования ими по точно фиксированным правилам (синтаксис) с последующим приписыванием результатам преобразования определенного смысла (семантика).

Первый этап формализации связан с разработкой научных языков. Знаки естественного языка (алфавит, слова, выражения, предложения и т.д.) соединены правилами грамматики, смысла и употребления. В отличие от них знаки научных языков создаются для решения специальных задач науки и приспособлены к точному описанию и объяснению определенных объектных областей в рамках математики, физики, химии, биологии, медицины, технико-технологических и других наук. Научные языки здесь отличаются, во-первых, специальной лексикой, т.е. набором основных терминов, понятий и категорий; во-вторых, специальными правилами построения и преобразования сложных языковых выражений (положений, аксиом, формул, уравнений и др.); в-третьих, использованием специальных знаков - символов, заменяющих слова и выражения естественного языка.

Методы эмпирических исследований

Эмпирическое исследование – это исследование, выполненное опытным путем, т.е. с помощью экспериментов, наблюдений. Его принципиальная важность в том, что оно представляет исходный уровень научного познания. Благодаря этому в науке обеспечивается накопление, закрепление, группировка, классификация и обобщение исходных данных для построения теоретического знания. Однако построение теории на основе эмпирических данных не заканчивает цикл исследований, поскольку правильность теории требует доказательства и подтверждения. Вследствие этого научное исследование продолжается в двух направлениях: одно – эмпирическая проверка правильности научной теории, второе – объяснение и предсказание материальных явлений, вытекающих из теории.

Правильность предсказания также подтверждается наблюдением или экспериментом, здесь также возможны всякого рода сложности. В конце концов «стыковкой» теоретических выводов и данных опыта завершается полный цикл исследования, в *цикле ключевая роль* принадлежит наблюдению, эксперименту и измерению.

Эмпирические данные должны быть обязательно закреплены и представлены в знаковых формах научного языка данной научной дисциплины и области знания, т.е. описаны способами, принятыми в конкретной науке, и в первую очередь –

качественными терминами. Таким образом, методы эмпирического исследования в целом выстраиваются в следующую логическую цепочку: *наблюдение - эксперимент - описание - сравнение - измерение*.

Наблюдение

Под научным наблюдением понимают метод отражения внешних свойств и отношений изучаемых объектов на основе их систематического целенаправленного восприятия и закрепления результатов в знаковых формах языков конкретных наук.

Наблюдение является неотъемлемым, сущностным свойством практической деятельности человека, поскольку оно является исходным моментом формирования вероятностного прогнозирования. Поэтому *научное наблюдение* по сути является усовершенствованием и развитием практики наблюдения пастухов, рыбаков, рудознатцев, костоправов, травников., сопровождающее практику, в той или иной степени всегда было свойственно человеку.

Даже простое обращение к ряду конкретных наук показывает, что основу наблюдения, как правило, предваряют и сопровождают активные инструментальные операции исследователя. Для изучения определенных химических веществ их предварительно надо отделить от примесей, следовательно, растворить природный образец и разделить его компоненты тем или иным способом. В геологических наблюдениях приходится делать искусственные обнажения горных пород, рыть шурфы, высверливать образцы при бурении. Изучая миграцию птиц, их отлавливают, кольцуют и по месту отстрела определяют координаты путей. Гистологи, изучающие морфологию тканей, подкрашивают или специально подсвечивают образцы ткани.

Описание и сравнение

Эмпирическое описание – метод закрепления средствами естественных или искусственных языков состава, свойств, связей и отношений исследуемого объекта, полученных в наблюдении.

Описание завершает наблюдения, при этом исследователь как можно детальней закрепляет преимущественно внешние стороны изучаемых объектов. Описание по сути представляет собой перевод чувственной информации на естественный язык и придание ему формы *повествования*. Ученые-естественники XVII-XVIII веков оставили после себя яркие страницы «естественной истории» в дневниках и путевых записках, письменных отчетах и других документах, описывая различные свойства животных, растений, минералов, включая географические, геологические и этнографические научные зарисовки. Основным смысл их поисков и наблюдений заключался в поиске нового: острова, минерала, вида растений и животных. Для этого требовалось подробное описание.

Опыт научных исследований свидетельствует, что обилие материала без сравнения и сопоставления не позволяет сделать полезного для науки вывода. Поэтому содержание описания в первую очередь подвергается операции сравнения.

Сравнение - метод получения нового научного знания на основе установления сходства или различия исследуемых объектов.

Метод сравнения является наиболее древним и распространенным, используется практически во всех актах познавательной деятельности, поскольку «все познается в сравнении». Основанием для сравнения объектов является их общий признак или группа признаков. Выделение общих признаков, по которым проводится сравнение, диктуется целями и задачами исследования, которые ограничивают круг сравниваемых объектов.

В сравнении главное не различие вещей, а вывод из сравнения. Вывод из сравнения всегда выступает в виде характеристики одного сравниваемого объекта относительно другого. Иными словами, сравнение дает лишь относительное знание: объект *A* может быть выше, ниже, теплее, темнее, ярче, тверже, пластичнее объекта *B*.

Измерение

На этапе описания и сравнения в первую очередь пытаются выяснить *свойства* объектов, т.е. их способность обнаруживать те или иные стороны в процессах взаимодействия. Систематизация свойств позволяет судить о качестве, поскольку *качество* - это система важнейших, необходимых свойств объекта, без которых он не существует. Качество неотделимо от *количества*, т.е. внутрикачественного различия объектов, характеризуемого числом и величиной.

Число - одно из основных понятий математики, при помощи которого обозначается и отображается какая-либо количественная характеристика объекта, называемая величиной. *Величина* - это все то, что может быть больше или меньше, что может быть присуще объекту в большей или меньшей степени. Чтобы реальному объекту приписать ту или иную *числовую величину*, его следует измерить, т.е. экспериментально сравнить с качественно однородной единицей измерения.

Измерение - метод научного исследования и процесс, отражающий в реальном объекте свойства и отношения, характеризуемые числом и величиной.

Сложный комплекс теоретических, методологических, технических, организационных и др. проблем, охватываемых специальной наукой называется *метрологией*.

Метрология - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. *Основные проблемы метрологии*: создание общей теории измерений; образование единиц физических величин и систем единиц; разработка методов и средств измерений, методов определения точности измерений, основ обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений; создание эталонов и образцовых средств измерений, проверка мер и средств измерений.

Результат измерения *физической величины* (длины, массы, скорости, силы, температуры, напряженности электрополя, периода колебаний и т.д.) получают с помощью единиц измерения. *Единица измерения* - это конкретное значение физической величины, принято за основание при сравнении и количественной оценке однородных величин.

С помощью основных единиц измерений производят *прямую, непосредственную* эмпирическую процедуру *измерения* как сравнение некоторого измеряемого свойства с принятым эталоном. *Эталоны* - это вещи, меры, измерительные приборы, *обеспечивающие* воспроизведение, сохранение и передачу единиц измерений с наивысшей точностью, достижимой при данном состоянии науки и техники.

На базе принятых эталонов создана международная система единиц физических величин, сокращенно СИ (*SI - Systeme International*). В этой связи отдельные эталоны имеют свою непростую историю. Так, в качестве эталона основной единицы СИ - *метра* служил брус из платиноиридиевого сплава с нанесенными на одной из его плоскостей штрихами (хранится в Международном бюро мер и весов в Севре близ Парижа). Из этого же материала выполнен международный эталон единицы массы - *килограмм* в форме цилиндра диаметром и высотой 39 мм.

Первоначально метр был определен как 1×10^{-7} часть $\frac{1}{4}$ длины земного меридиана (Франция, 1791). Для измерения дуги земного меридиана потребовалось семь лет работы научной экспедиции. С 1960 по 1983 год метр определяли через световой эталон как длину, равную 1.650.763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу уровнями $2p^{10}$ и $5d^5$ изотопа криптона-86 (оранжевая линия спектра излучения). Согласно определению, принятому 17-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1983), «метр - длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299.793.458$ долю секунды». При этом одна из основных единиц СИ, эталонная единица времени *секунда* – определяется временем, равным 9.192.631.770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОРИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ

Удивительна и многогранна, впечатляюще насыщена яркими событиями и сложна биография физики. Столетиями эволюционировали физические знания: от первых интуитивных и наивных идей о дискретной природе материи (атомах вещества) до современных представлений об элементарных и субэлементарных частицах и важнейших событий XXI века – открытия «скрытой материи» и «темной энергии» во Вселенной с очень необычными свойствами, ставящими новые проблемы фундаментального характера. Но прежде чем стать наукой переднего края, физика прошла долгий и сложный путь развития.

Периодизация развития физики

Физика появилась как наука о природе, являясь вначале синонимом натурфилософии. Физика по мере накопления эмпирического материала, его обобщения и теоретического осмысления, в процессе дифференциации научного знания и выделения из него отдельных наук превратилась в научную дисциплину о свойствах и строении материи и формах ее движения, изучающую наиболее общие, фундаментальные закономерности явлений в мире.

Современная физика представляет собой сложную структуру, где все подразделения тесно связаны между собой благодаря глубокой внутренней взаимосвязи, существующей между объектами материального мира и процессами, в которых они участвуют. Физика являлась и является ведущей наукой естествознания, в то же время она создала фундамент для всех его областей.

Физика — теоретическая основа техники; результаты, получаемые в физике, всегда оказывали на нее стимулирующее воздействие, приводили к техническим революциям и переворотам, появлению новых технологий, новых отраслей техники. В свою очередь, развитие техники способствовало созданию новых методов физического исследования, обуславливающих развитие как самой физики, так и смежных дисциплин.

В то же время науке, в том числе и физике, свойственна своя внутренняя логика развития, собственные особенности эволюции. «Для того чтобы определить, в каком направлении происходит развитие физической науки, — писал М. Планк, — есть только один способ; *сравнить* современное состояние ее с тем, в котором она находилась в прежнее время. Если же спросить, какой внешний признак может дать лучшую характеристику данной стадии развития какой-нибудь науки, то я не могу указать более общего признака, чем тот способ, по которому наука определяет свои основные понятия и подразделяет свои области».

Однако развитие науки – не просто механический процесс их накопления. В науке порой возникают ситуации, когда накопление новых знаний не поддается объяснению в рамках существующих теоретических схем, тогда приходится искать новые, интенсивные пути ее движения вперед. А это, как правило, приводит время от времени к так называемым научным революциям, к радикальной ломке основных структурных составляющих науки, иными словами, к выдвижению новых принципов познания, новых категорий и методов исследования. Чередование экстенсивных и революционных периодов развития характерно как для науки в целом, так и для отдельных ее отраслей. Точки роста современной науки лежат, как правило, на пересечении двух путей – внутренней логики ее развития с диктуемыми обществом все более разнообразными социальными потребностями. Фундаментальные *физические идеи* и созданные *на их* основы теории определяют кульминационные, революционизирующие моменты в развитии физики.

Важную, а иногда и решающую роль в развитии науки играют и отдельные выдающиеся ученые, такие, как Г. Галилей, И. Ньютон или М. В. Ломоносов, творчество которых является переломным моментом в развитии научных знаний, вершиной достижений человеческой мысли. Поворотные вехи в истории физики украшены также именами М. Фарадея и Дж. Максвелла, М. Планка и А. Эйнштейна, Л. де Бройля и Н. Бора.

Развитие физики как науки неотделимо от возникновения и развития науки как явления, от развития социально-экономической структуры общества. Поэтому краткий очерк исторического развития физики в известной мере отражает этапы развития цивилизации.

Совокупность перечисленных условий, тесно связанных между собой, и определяет поступательное движение науки, эволюцию научной картины природы. Поэтому, исходя из приведенных выше факторов, можно построить схему периодизации физики и определить основные этапы в ее развитии:

Предыстория физики – Период возникновения отдельных элементов физических знаний (VI в. до н. э. до XVII в.):

- эпоха античности (VI в. до н. э. — V в. н. э.);
- средние века (VI—XIV вв.);
- эпоха Возрождения (XV—XVI вв.).

Период становления физики как науки (начало XVII — 80-е гг. XVII в.).

Период классической физики (конец XVII—начало XX в.):

- первый этап (конец XVII — 60-е гг. XIX в.);
- второй этап (60-е гг. XIX — конец XIX в.);
- третий этап (конец XIX — начало XX в.).

Период современной физики (с 1905):

- первый этап (1905—1931);
- второй этап (1932—1954);
- третий этап (с 1955).

Предыстория физики

Эпоха античности — эпоха древней греческо-римской культуры, когда высокого уровня развития достигли философия, литература, изобразительное искусство, архитектура. Характерными чертами древнегреческого естествознания были систематическое накопление фактов и попытки их объяснения, слабый эмпирический фундамент и большое количество общих гипотез и теорий, в которых, правда, древнегреческая естественнонаучная мысль предсказала, а порой и предвосхитила, немало позднейших научных открытий.

В III-II тысячелетиях до н.э. были созданы солнечные и водяные часы. Это означает, что уже в той древности существовало понятие времени – вчера, сегодня, завтра.

Множество мифов древнего мира связано с астрономическими наблюдениями. На Древнем Востоке – в Египте, Ассирии и Вавилоне и других древнейших цивилизациях небесные светила считались божественными. В итоге многовековых наблюдений полных и частных затмений Луны и Солнца вавилонский и египетский жрецы открыли закон «великого повторения», который позволял предсказывать дату будущих затмений и отмечать прошедшие. Жрецы создали первый календарь.

Зачатки научных знаний существовали в Древнем Китае и Древней Индии. В Древнем Китае до н.э. *пришли к понятию силы*. Так сложилось, что дальнейшее развитие физики в Древнем Китае прекратилось под влиянием господства учения Конфуция (около 551—479 до н.э.). Конфуциане признавали только прикладную деятельность человека, а не общие философские рассуждения. Можно быть хорошим ремесленником без философских знаний.

В эту эпоху *зародились начальные идеи об атомарном, дискретном строении материи* (Демокрит, Эпикур, Лукреций, V– IV вв. до н. э.). Была *построена первая модель мироздания – геоцентрическая система мира* (Эвдокс Книдский, Аристотель, Гиппарх, Птолемей, IV в. до н. э. – II в. н. э.). Возникла *идея гелиоцентризма* (Аристарх Самосский, III в. до н. э.); созданы основы геометрии, открыты законы прямолинейного распространения света и отражения света, положено начало геометрической оптике (Евклид, III в. до н. э.). Открыты простейшие электрические и магнитные явления (Фалес Милетский, VI в. до н.э.), обнаружено преломление света, установлен ряд закономерностей статики (правило рычага, центр тяжести) и гидростатики (закон Архимеда, условия плавания тел). Фалес положил начало философии природы, основной идеей которой было единство природы и человека. Считал, что в основе природы находятся некие *стихии*. Все материальные объекты происходят от нее и превращаются в итоге в нее же. Такой *первоосновой он считал воду*.

Совокупно с проблемой единства мира возникла проблема «движущей силы» – причины рождения нового и отмирания старого. Гераклит высказал идею о непрерывном изменении, становлении – постоянно только непрерывное изменение. Афоризм Гераклита «*в одну и ту же реку нельзя войти дважды*». Эмпедокл развивал

идею о четырех вечных неизменных первоначалах (570-430 до н.э.) – под действием сил любви и вражды Космос то соединяется, то распадается.

Оригинальный взгляд на мир разрабатывал Пифагор и его школы (пифагорейцы). В основе всего они считали лежит гармония, а гармония в первооснове содержит число.

Видное место в истории древнегреческой науки занимал Аристотель. Он собрал и систематизировал огромный естественнонаучный материал своих предшественников, критически его оценил, исходя из своих философских взглядов, подвел как бы итог приобретенных званий, сам осуществил ряд глубоких наблюдений. В частности, с его именем связано: *зарождение элементов механики*; понятие движения как общего изменения; механического движения как перемещения в пространство; правило сложения перемещений, перпендикулярных одно к другому. Физика Аристотеля, хотя и содержала отдельные правильные положения, в то же время игнорировала идеи атомизма и гелиоцентризма. Признавая значение опыта Аристотель, однако, не считал его основным критерием достоверности знания и отдавал предпочтение умозрительным представлениям. Канонизированное церковью в средние века учение Аристотеля надолго затормозило развитие науки.

Были заложены Архимедом основы *статики*, как части механики (290-211 до н.э.). Считал, что всякое научное положение должно быть математически строго доказано. В таком духе он изложил основы гидростатики в трактате «*О плавающих телах*). Сочинения Архимеда много лет оставались малоизвестными. Только в XVI веке стали вводиться в механику «*архимедовские традиции*», благодаря усилиям учеников и сторонников Галилея.

Энциклопедией астрономических и оптических знаний более тысячелетия считался трактат Клавдия Птолемея (90-160 н.э.) «*Великое математическое построение астрономии в XIII книгах*».

Средние века характеризуются господством схоластики в теологии в Западной Европе и спорадическими открытиями у арабских народов. Средневековые церковники выхолостили учение Аристотеля, сделали из него мертвую схоластику, выбросив все поиски, приемы постановки вопросов. Не содействовало формированию естественнонаучных знаний и развитие техники, которое происходило очень медленно. Однако процесс накопления новых фактов (особенно с XIII в.) все же происходил.

Известным физиком средневековья был Альхазен (965-1039). Он построил теорию зрения, провел ряд опытов с камерой-обскурой, исследовал преломление света, рассмотрел различные виды зеркал, высказал мысль о конечности скорости света.

Своеобразным курсом средневековой физики была «Книга о весах мудрости» (1121) АлХазини, в которой содержатся таблицы удельных весов многих твердых и жидких тел, описаны опыты по «взвешиванию» воздуха, по наблюдению явления капиллярности, отмечено, что удельный вес зависит от температуры, вес тела

пропорционален количеству вещества в теле, скорость измеряется отношением пройденного пути ко времени и др.

После многих веков застоя, когда научная мысли Европы практически не развивалась, в X-XI вв возник интерес к учениям древних мыслителей. Стали активно переводиться сочинения арабских и греческих философов на латынь – Евклид, Архимед, Птоломей и другие.

После насыщения Европы литературой возникла потребность осмыслить богатейшее наследие античности. Появились комментаторы. Одним из первых стал Роберт Гроссетест (1175-1254) из Оксфордского университета. Много уделял внимания оптике, так как согласно Библии свет был первым божественным творением.

В 1269 появился рукописный трактат П. Перегринна «О магнитах», где описаны методы определения полярности магнита, взаимодействие полюсов, намагничивание прикосновением, явление магнитной индукции, некоторые технические применения магнитов. В трактате по оптике Э. Вителлия (1271) содержится наряду с изложением того, что сделали Евклид, Птоломей и Альхазен, формулировка закона обратимости световых лучей при преломлении, доказывається, что параболические зеркала имеют один фокус, исследуется радуга.

В этот же период протекала деятельность известного английского философа и естествоиспытателя Р. Бэкона (ок. 1214-1292), критиковавшего схоластов и видевшего *основу познания в опыте*. Бэкон измерил фокусное расстояние сферического зеркала, открыл сферическую абберацию, выдвинул идею зрительной трубы, был предвестником экспериментального метода.

В последующем XIV в. введены понятия ускорения и угловой скорости, произведено деление механического движения на поступательное и вращательное, равномерное и переменное, введено представление о равномерно-переменном движении и установлен его закон, связывающий путь, пройденный телом, и время.

Т.о. в конце 15 начале 16 века создалась необходимость для дальнейшего обобщения накопленного естественнонаучного материала. Но это было невозможно ни в рамках схоластики, ни в рамках чисто технических дисциплин. Требовалось новое мировоззрение, новое понимание методов и задач познания, освобождение науки от схоластики и религии. Требовалась новая наука, как источник полезных сведений. Ей могла быть только экспериментальная наука о природе – естествознание.

Эпоха Возрождения – период социально-экономических сдвигов в европейском обществе и зарождения новых производственных отношений. Это время научной революции, начавшейся в 16 веке и охватившей все стороны мировоззрения. Это было время революционного изменения взглядов на место человека, на значение и метод научного познания. В результате возникла новая наука – *экспериментальное естествознание*.

Резко против магических объяснений природных явлений выступал Ленаардо да Винчи (1452-1518). Он исследовал отражение звука и сформулировал принцип

независимости распространения звуковых волн от различных источников. Открыл существование сопротивления среды и подъемной силы, исследовал законы зрения.

Большой вклад в развитие механики внес Джованни Бенедетти (1530-1590). Он изложил принцип инерции для объяснения ускорения движущегося тела, установил существование центробежной силы, разработал теорию равновесия жидкости в сообщающихся сосудах.

Научная революция начинается в астрономии с появления сочинения Коперника. В нем утверждалось новое представление о строении мира и месте в нем Земли. Он отбросил господствующую тогда геоцентрическую систему Птолемея и создал гелиоцентрическую. Это было не просто замена одной схемы строения планетной системы другой. Это был слом истин, казавшихся очевидными. Свою систему Коперник изложил в трактате «Об обращении небесных сфер» (1543).

В XVI в. выполняется ряд исследований итальянскими учеными в области механики (Н. Тарталья, Дж. Кардано, Г. Убальди дель Монте, Дж. Бенедетти) и оптики (Ф. Мавролик, Дж. Порта).

В 1584 был опубликован диалог «О бесконечности, Вселенной и мирах» выдающегося итальянского мыслителя и активного сторонника коперникового учения Дж. Бруно (1548-1600), в котором содержалась идея о бесконечности Вселенной, о существовании в ней, кроме солнечной, других планетных систем, предсказаны новые планеты в нашей солнечной системе, вращение Солнца и звезд вокруг оси, выдвинута идея о единстве законов природы.

В работах голландского ученого С. Стевина (1548-1620) получила свое завершение статика древних. Он сформулировал теорему о треугольнике сил, открыл законы сложения сил и разложения силы на две взаимно перпендикулярные составляющие, дал оригинальное доказательство условия равновесия тела на наклонной плоскости, основанное на невозможности вечного двигателя.

В конце XVI в. было открыто свойство изохронности колебаний маятника (Г. Галилей), построены термоскоп – первый термометр (Галилей), зрительная труба и микроскоп (Захарий Янсен). Они стали мощными орудиями эксперимента: термометр привел к количественному изучению тепловых явлений, зрительная труба, превращенная Галилеем в телескоп, положила начало оптической астрономии, микроскоп позволил человеку «заглянуть» в мир клетки. Этим завершается период Возрождения в физике, завершается и ее предыстория, начинается новая фаза – становления физики как научной дисциплины.

Период становления физики как науки

В эпоху Возрождения физические наблюдения и опыты еще не носили систематического характера и не были объединены единым методом исследования. XVII в. положил начало систематическому использованию в физике

экспериментального метода, творцом которого и последовательным проводником стал Г. Галилей – один из основоположников точного естествознания.

«...Прежде чем человечество созрело для науки, охватывающей действительность, – писал А. Эйнштейн, – необходимо было другое фундаментальное достижение, которое не было достоянием философии до Кеплера и Галилея. Чисто логическое мышление не могло принести нам никакого знания эмпирического мира. Все познание реальности выходит из опыта и возвращается к нему. Положения, полученные при помощи логических способов, при сравнении с действительностью оказываются совершенно пустыми. Именно потому, что Галилей признавал это, и особенно потому, что он внушал эту истину ученым, он является отцом современной физики и, фактически, современного естествознания вообще».

Галилей установил принципы относительности и инерции, законы свободного падения, движения тела по наклонной плоскости, движения тела, брошенного под углом к горизонту, сложения движений. Он показал, что не скорость, а ускорение есть следствие внешнего воздействия на тело, доказал факт равенства гравитационной и инертной масс. *От Галилея берет свое начало динамика.*

Создание Галилеем первого телескопа (1609) и выполненные им широкие астрономические исследования со всей очевидностью доказали объективный характер гелиоцентризма, способствовали победе и утверждению гелиоцентрической системы мира Коперника. В своем творчестве Галилей руководствовался идеей единства мира.

Цель науки Галилей видел в отыскании причин явлений, а задачу ученого — в «изучении великой книги природы». *Галилеем открывается первый этап в развитии физики, который завершается И. Ньютоном.* Именно Галилей, а перед ним также И. Кеплер, установивший три закона движения планет (1609— 1619), раскрыв тем самым кинематический аспект строения солнечной системы, подготовили путь Ньютону, который завершил создание механики (80-е гг. XVII в.) и построил *первую научную картину природы – механическую картину мира.*

На этом этапе формирования физики как науки, который длился почти столетие, было получено немало новых сведений. Заложены основы электро- и магнитостатики (У. Гильберт, 1600). В области оптики открыт: закон преломления света (В. Снеллиус, ок. 1621; Р. Декарт, 1630); обнаружены явления дисперсии света (Я. Марци, 1648; И. Ньютон, 1666). Кроме того, открыто явление дифракции (интерференции) (Ф. Гримальди), двойного лучепреломления (Э. Сартонин. 1669), поляризации (Х. Гюйгенс, 1678), измерена скорость света (О. Рёмер, 1676). Сформулирован основной принцип геометрической оптики (П. Ферма, 1662), разработаны корпускулярная (И. Ньютон, 1666) и волновая (Х. Гюйгенс. 1678) теории света. Быстро развивается геометрическая оптика, закладываются основы физической оптики. Так, согласно Гюйгенсу, свет представлял собой волны, распространяющиеся в особой среде – эфире, наполняющей все пространство и проникающей внутрь тел.

В механике Х. Гюйгенс изучает криволинейное движение, создаст теорию физического маятника, устанавливает понятие момента инерции и законы центробежной силы (1673), подготавливая тем самым почву для открытия второго закона механики и закона всемирного тяготения. В 1657 Гюйгенс сконструировал маятниковые часы, ставшие основой точной экспериментальной техники. Установлены законы удара упругих и неупругих тел, закон сохранения количества движения (Х. Гюйгенс, 1669), основной закон упругости (Р. Гук, 1660).

В семнадцатом веке обострился многовековой спор о существовании вакуума. Фактически это был спор между сторонниками и противниками атомной гипотезы. В атомной гипотезе вакуум органично вводился как пустое пространство, в котором движутся атомы. Противники атомной гипотезы категорически отвергали как атомы, так и вакуум. Открытие атмосферного давления и первые барометрические опыты Торричелли в 1643-1644 гг. (*«торричеллиева пустота»*), давали неоспоримые аргументы в борьбе с господствовавшим в то время учением Аристотеля. В дальнейшем число таких аргументов увеличивалось. В 1654г. немецкий физик, бургомистр Магдебурга Отто фон Герике (1602-1686) осуществил знаменитый опыт с *«магдебургскими полушариями»*, наглядно показавший существование вакуума и атмосферного давления. Было также экспериментально обнаружено уменьшение атмосферного давления с высотой (Ф. Перье, Б. Паскаль, 1648).

В 1661 Р. Бойль и Р. Тоунли установили обратно пропорциональную зависимость давления газа от объема, переоткрытую в 1676 Э. Мариоттом (закон Бойля - Мариотта). В результате этих открытий уже в 1-й половине XVII в. возникло учение о газах. В это же время М. Мерсенн закладывает основы физической акустики.

Ученых семнадцатого века, как и в предыдущие времена, интересовали проблемы строения и свойств материи. В этот период продолжались дискуссии между сторонниками и противниками атомной гипотезы. Исходя из гипотезы о корпускулярном строении вещества, Фрэнсис Бэкон в трактате *«Новый органон»* (1620) впервые высказал идею о том, что теплота связана с движением частиц, составляющих вещество. Кинетические представления о теплоте разделяли также английские физики Роберт Бойль (1627-1691) и Роберт Гук. В 1661 г. Бойль в трактате *«Химик-скептик»* впервые ввел понятие химического элемента как простейшей составной части тела.

Практическую ценность естествознания начинают понимать и государственные деятели, которые покровительствуют развитию науки. Возникает новая форма институализации науки – Академии наук.

Однако накопленная сумма разнородных знаний и фактов еще не была оформлена, не объединена в единую систему, которая *в свою очередь охватила бы всю природу*. Единая общая картина мира была создана И. Ньютоном как завершенная система механики, законы которой управляют всеми явлениями природы. Именно она и открыла новый период в развитии физики.

Период классической физики

В 1687 вышел в свет основополагающий труд И. Ньютона «Математические начала натуральной философии», содержащий основные понятия и аксиоматику механики, в частности представления об абсолютном пространстве и абсолютном времени, понятие состояния, массы, закон пропорциональности силы ускорению и закон всемирного тяготения. Исходя из последнего закона, Ньютон объяснил движения небесных тел, в результате чего стал возможен *переход от кинематического описания солнечной системы к динамическому*. Это окончательно утвердило победу учения Коперника.

В «Началах» также была объединена земная механика с небесной. Создалось впечатление, что законы механики управляют всеми процессами в природе. *«Таким образом, Ньютон заложил основы той совокупности законов природы, которая дает возможность понять законы всех явлений, — писал А. Эйнштейн. Ньютон считал, что этого можно достичь за счет сведения любых процессов к движениям частиц, которые взаимодействуют между собой».*

Ньютон построил первую физическую картину мира (механическую картину) с абсолютным временем и пространством и концепцией дальнего действия, которая длительное время господствовала в науке. «...Ньютон был первым, кому удалось найти ясно сформулированную основу, из которой с помощью математического мышления можно было логически прийти к количественному согласующемуся с опытом описанию широкой области явлений», — отмечал А. Эйнштейн. Построенный Ньютоном фундамент физики оказался исключительно плодотворным и до конца XIX в. считался незыблемым. Вот почему год выхода в свет «Начал» можно считать этапным и принять за начало нового периода в истории физики — периода классической физики, длившегося два столетия, пока под давлением новых фактов возведенная Ньютоном и его последователями величественная и грандиозная система не начала рушиться.

Первый ощутимый удар по учению Ньютона нанесла теория электромагнитного поля Максвелла, дальнейшее развитие которой углубило ее противоречия с классической механикой и, в конце концов, привело к пересмотру основных положений физики. Это была *вторая после ньютоновской фундаментальная физическая теория*. Поэтому в периоде классической физики целесообразно выделить ряд этапов.

Первый этап проходит под знаком полного господства механики Ньютона, его механическая картина мира совершенствуется и уточняется, в ней обнаруживаются новые специфические черты. Бурно развиваются все области физики. Этот этап по времени непосредственно совпадает с утверждением в Западной Европе новых капиталистических отношений и их развитием, приведшим во второй половине XVIII— начале XIX в. к технической и промышленной революциям.

Значительного совершенства и стройности достигла механика в трудах Ж. Даламбера, Л. Эйлера, Ж. Лагранжа и П. Лапласа. Так, Лагранж, введя в 1760

обобщенные координаты, придал уравнениям движения такую форму, которая сделала возможным их применение и к немеханическим процессам, в частности электромагнитным. Триумфом механики Ньютона было открытие (1846) Нептуна, основанное на теоретических вычислениях У. Леверье (1846), после чего вера в механическое описание стала всеобщей (22). Ход развития классической механики демонстрировал справедливость единого закона природы — закона гравитации — как на Земле, так и во Вселенной.

Был открыт ряд законов сохранения: материи и движения (М. В. Ломоносов, 1748), электрического заряда (Б. Франклин, 1750), энергии (Ю. Майер, 1842; Дж. Джоуль, 1843; Г. Гельмгольц, 1847). Причем, Гельмгольц распространил закон сохранения энергии с механических и тепловых процессов на другие области явлений — электрические, магнитные, оптические. Именно в этом законе нашло свое отражение единство различных физических процессов. Физику стали представлять единой цельной наукой.

Был установлен ряд газовых законов: закон Шарля (1787), Гей-Люссака (1802), сформулировано уравнение состояния идеального газа (Б. Клапейрон, 1834)/ опытами Б. Румфорда (1798) и Г. Дэви (1799) подтверждена механическая теория теплоты, наложенная в работах Д. Бернулли, Л. Эйлера и М. В. Ломоносова. В 50-х гг. XIX в» были заложены основы кинетической теории газов (Дж. Джоуль, Р. Клаузиус. Дж. Максвелл) и термодинамики (Р. Клаузиус. У. Ранкин, У. Томсон); начало термодинамике заложил Н. Карно, 1824).

Второй этап. Этот период развития классической физики вошел в историю, прежде всего как время создания теории электромагнитного поля Фарадеем и Максвеллом. *Электродинамика как порождение 19 века явилась первой областью физики, в которой были применены полевые концепции, получившие в дальнейшем широкое распространение.* В итоге также впервые была показана определяющая роль электромагнитных сил в веществе.

В этом же этапе было завершено создание термодинамики (Р.Клаузиус, Л.Больцман, Дж.Гиббс). Клаузиус ввел понятие энтропии.

Третий этап характеризуется ломкой многих устоявшихся принципов классической физики. Существовали факты, при объяснении которых классическая теория сталкивалась с большими трудностями, например неинвариантность уравнений Максвелла-Лоренца относительно преобразований Галилея. Эти трудности можно было преодолеть, только привлекая совсем новые понятия и идеи, коренным образом отличающиеся от господствующих классических представлений.

Процесс революционного преобразования физики готовили также открытия конца XIX - начала XX в. В 1895 В. Рентген открыл излучение, названное его именем (рентгеновские лучи), в 1896 А. Беккерель — радиоактивность урана, в 1897 Дж. Дж. Томсон — электрон — новую частицу материи, в 1898 М. Склодовская-Кюри и П. Кюри — радиоактивные элементы полоний и радий, в 1900 М. Планк выдвинул идею квантов, в 1902-1903 Э. Резерфорд и Ф. Содди установили закон радиоактивных

превращений. Экспериментально были доказаны зависимость массы электрона от скорости (В. Кауфман, 1902) и образование гелия из радона (У. Рамзай и Ф. Содди, 1903); последнее свидетельствовало о взаимной превращаемости элементов. В 1903 было также обнаружено непрерывное выделение тепла солями радия.

Неожиданно окружающий мир стал намного сложнее, чем представлялся ранее. *Макромир, рисовавшийся ученым XIX в. как миниатюрная копия макромира с полным качественным отождествлением макро- в микрообъектов и различающихся лишь количественно, оказался полным необъяснимых неожиданностей.* Отчетливо проявилась ограниченность представлений физики XIX в. Привычный ньютоновский мир стал давать «трещины» по всем направлениям. Причем, речь шла не о деталях, рушились все механические основания этого мира» Это дало повод М. Планку сказать: «Современная теоретическая физика может произвести впечатление старого» почтенного, но уже обветшавшего здания, в котором одна часть за другой начинает рушиться, и даже сам фундамент начинает шататься» (37, с. 73). Таким образом» была подготовлена почва для революции в физике. Знамя этой революции несли М. Склодовская-Кюри и П. Кюри, Дж. Дж. Томсон и Э. Резерфорд, Х. Лоренц в М. Планк.

Поэтому годы с 1895 по 1904 – это годы революционных изменений в физике, этап перехода к новой, современной физике. Этот этап крутой ломки старых понятий, когда новейшие естественнонаучные открытия разрушали старые метафизические представления о неделимости атомов, неизменности химических элементов, постоянстве массы» когда отбрасывались старые принципы науки и открывались новые свойства материального мира.

Период современной физики

Годы 1895–1904 были этапными в переходе к новой физике, физике XX в., фундамент которой заложили теория относительности и квантовая теория. Начало ее можно отнести к 1905 г., когда А. Эйнштейн разработал третью после механики Ньютона и электродинамики Максвелла великую физическую теорию – специальную теорию относительности. При этом переход от классической физики к современной характеризовался не только возникновением новых идей, концепций и понятий, но и новыми способами мышления, новым языком формул, изменением ее духа в целом. В современной физике целесообразно выделить три этапа.

Первый этап начинается с создания специальной теории относительности, которая своим происхождением обязана фундаментальному противоречию, существующему между электродинамикой Максвелла-Лоренца и классической механикой. Дело в том, что уравнения электродинамики не удовлетворяют галилеевский принцип относительности классической механики, иначе говоря, они неинвариантны относительно преобразований Галилея. В электродинамике преимущество отдавалось некоторой системе координат. С ней ассоциировали

систему, находящуюся в покое по отношению к эфиру – абстрактной гипотетической среде, лишенной всяких физических свойств, которая служила для фиксации систем отсчета, где справедливы уравнения электродинамики. По теории Максвелла-Лоренца для наблюдателя, движущегося относительно эфира, световые явления должны были бы протекать иначе, чем для неподвижного. Это означало, что изучение этих явлений в движущейся системе координат позволит определить скорость этой системы относительно эфира. Однако опыты, в частности опыт Майкельсона - Морли (1887), проведенные с целью обнаружить движение Земли относительно эфира (так называемый «эфирный ветер»), дали отрицательный результат. Они свидетельствовали, что движение Земли не оказывает влияния на электродинамические явления и что не существует привилегированной системы отсчета.

Второй этап. Период с 1905 до 1932, когда физика вплотную приблизилась к исследованию еще меньших объектов, чем атом, начав штурм его ядра, целесообразно назвать квантово-релятивистским. С созданием квантовой механики на ее основе возникла квантовая картина мира. Квантовая механика, по словам Дирака, «привела к такому значительному перевороту в наших представлениях о физической картине мира, которого, вероятно еще не знала история физики».

Анализ исторического развития физики обнаруживает одну характерную закономерность процесса физического познания – *тенденцию исследовать явления во все меньших пространственно-временных масштабах при всевозрастающих энергетических параметрах.*

В это время была установлена протонно-нейтронная структура ядра, открыт нейтрон. Это указывало нового типа сил в природе неэлектромагнитного происхождения, удерживающих протоны и нейтроны тесно связанными в ядре. Открытие позитрона обнаружило в явном виде фундаментальную симметрию природы, проявляющуюся в существовании двух типов материи – вещества и антивещества. Поэтому *1932 год*, когда физики проникли в область ядра, установив его сложный протонно-нейтронный состав, и был открыт новый тип взаимодействий – сильных, можно считать *началом новой физической науки – ядерной физики.*

Третий этап. С начала 50-х годов благодаря появлению современных ускорителей было открыто много новых элементарных частиц – антипротон, антинейтрон, антинейтрино, ряд гиперонов, появились доказательства внутренней структуры нуклона.

Возникла принципиально новая концепция структуры материальных частиц, согласно которой частицы меньших масс строятся из частиц больших масс, например модель кварков Гелл-Манна-Цвейга (1964), партонная модель Фейнмана (1969).

В 1974 году были обнаружены принципиально новые тяжелые частицы – пси-частицы, представляющие комбинацию новых типов кварков (очарованных).

Благодаря успехам в теории и эксперименте физики добились заметного прогресса на пути адекватного описания частиц и их взаимодействий. *Сегодня*

считается, что материя построена лишь из двух типов элементарных частиц – лептонов и кварков и в природе действуют четыре силы – гравитационные, электромагнитные, слабые и сильные. С помощью этого набора частиц и сил в принципе можно объяснить всю наблюдаемую иерархию материальных структур – от нуклонов и ядер до звезд и галактик.

Существенно развиты представления об агрегатных состояниях вещества – твердом, жидком, газообразном, плазме. Были открыты новые состояния – нейтронное, фрактальный клубок и т.д. Достигнуты большие успехи в исследованиях экстремальных состояний вещества (с колоссальной концентрацией энергии). Одним из важных событий XXI в. стало открытие «скрытой материи» и «темной энергии» во Вселенной с очень необычными свойствами, ставящими новые проблемы фундаментального характера.

До высочайшего уровня доведены как теоретические, так и экспериментальные методы исследования явлений природы, в том числе с использованием современных информационных технологий. Постоянно проводятся с повышающейся точностью экспериментальная проверка фундаментальных положений современной физики – квантовой механики, теории относительности, квантовой электродинамики и др., а также измерения фундаментальных физических постоянных.

Выдающиеся открытия физиков привели к созданию и существенному развитию теории в различных областях (квантовая теория поля, теория гравитации, физика высоких энергий, физика твердого тела, ядерная физика, физика лазеров, физика ускорителей, физика плазмы, физика низких температур, физика высоких давлений, квантовая радиофизика, физика полупроводников, квантовая оптика, фотоника и т.д.). Они нашли также многочисленные применения в технике и жизни человеческого общества (атомная энергетика, нанотехнологии, лазеры разных диапазонов, жидкие кристаллы, изотопы, компьютерная техника, средства связи, бытовая электронная техника, применения в медицине, сельском хозяйстве и т.д.).

Невозможен дать краткий перечень всех достижений и проблем современной физики. Некоторые проблемы физики XXI века отметил выдающийся российский физик Нобелевский лауреат Виталий Лазаревич Гинзбург (УФН 172(2) с. 213, 2002; *В.Л. Гинзбург. О науке, о себе и о других.* - М.: Физматлит, 2003).

ИСТОРИЯ МЕХАНИКИ

Общее представление о механической форме движения и механике

Слово «механика» в переводе с греческого означает «*искусство построения машин*». В Древней Греции под механикой понимали простейшие механизмы – рычаг, ворот, блок, винт, клин, полиспаст. Со временем смысл термина изменился

Сейчас под механикой понимают науку, изучающую простейшую форму движения материи – *механическое движение*. Механическое движение состоит в изменении положения тела относительно других тел. Описание механического движения производится в определенной системе отсчета. *Системой отсчета* называют тело (или совокупность неподвижных друг относительно друга тел) вместе с приборами для измерения расстояний и промежутков времени. Механическое движение *относительно* – одно и то же движение будет различным в разных системах отсчета.

На основе изучения механического движения формируются представления о *физическом пространстве и времени*. Эти понятия являются фундаментальными, т. е. их нельзя определить через какие-то более простые понятия. Опытным путем установлены следующие их свойства: *физическое пространство трехмерно, однородно и изотропно, время одномерно и однородно*. Однородность времени проявляется в неизменности физических законов с течением времени: опыт, поставленный в одинаковых условиях в разные моменты времени, дает одинаковые результаты. С однородностью времени связано сохранение энергии. Однородность и изотропность пространства проявляются в независимости физических явлений в замкнутой (изолированной) физической системе от ее положения и ориентации как целого. С однородностью пространства связано сохранение импульса, с изотропностью – сохранение момента импульса. Современная механика состоит из трех основных разделов – *кинематики, динамики и статики*.

Кинематика. Задача *кинематики* — математическое описание движения тел без выяснения его физических причин, т.е. без учета их массы и действующих на них сил. Используемые в кинематике физические модели – материальная точка, твердое тело, сплошная среда. Основы кинематики заложил Л. Эйлер в 1736 г., хотя термин еще не существовал. Его ввел в 1834 г. Андре Мари Ампер.

Динамика. *Динамика* изучает механическое движение тел под действием приложенных к ним сил, используя представление об их *взаимодействии*. Взаимодействие тел – это причина *изменения скорости* их движения, т. е. *ускорения*. Ускорение тела не может быть задано произвольно: его значение в данный момент не зависит от предшествующего движения тела и определяется положением и движением окружающих тел. Термин «динамика» ввел в 1690 г. математик и физик Готфрид Вильгельм Лейбниц. Основу динамики составляют три закона Ньютона.

Первый закон Ньютона (закон инерции) позволяет выбрать системы отсчета, в которых законы движения выглядят наиболее просто: *существуют такие системы отсчета (называемые инерциальными), в которых движение свободного тела происходит равномерно и прямолинейно (с постоянной скоростью v)*.

Второй закон Ньютона связывает ускорение тела с действующими силами и его массой: *в инерциальной системе отсчета ускорение тела пропорционально векторной сумме действующих на него сил и обратно пропорционально массе тела:*

$$a = \frac{\sum_i F_i}{m}$$

Сила — это физическая величина, характеризующая взаимодействие тел. *Измерение сил* любой физической природы основывается на свойстве сил вызывать *деформацию упругих тел* и осуществляется с помощью динамометров.

Одна и та же сила разным телам сообщает различные ускорения. Чем меньше ускорение, тем больше *инертность* тела. Физическая величина, количественно характеризующая свойство инертности тела, называется *массой*. Измерение массы может основываться на сравнении ускорений, сообщаемых данному телу и эталонному телу одной и той же силой: отношение масс равно обратному отношению модулей ускорений.

Массы макроскопических тел на практике измеряют *взвешиванием*, т. е. сравнением действующей на тело силы тяготения с силой тяготения, действующей в том же гравитационном поле на эталон (гирю). Измерение массы взвешиванием основано на законе пропорциональности инертной и гравитационной масс.

Третий закон Ньютона количественно характеризует взаимодействие тел: *силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению:*

$$F_{12} = -F_{21}$$

В частности, третьему закону Ньютона удовлетворяют силы гравитационного взаимодействия (закон всемирного тяготения) и электростатического взаимодействия (закон Кулона). Силы взаимодействия материальных точек имеют *центральный характер*, т. е. направлены вдоль соединяющей их прямой. Этот закон предполагает мгновенное распространение взаимодействий, поэтому для взаимодействующих на расстоянии движущихся тел он справедлив лишь при достаточно медленных по сравнению со скоростью света движениях.

Статика. Статика с греческого «*стоящий*». Возникла в глубокой древности, изучаются условия равновесия тел, находящихся под действием приложенных к ним сил. Основатель – Архимед.

Современная физическая механика делится на *классическую* и *релятивистскую*. Классическая изучает движение тел на основе законов Ньютона. Релятивистская механика – это обобщение классической механики, основанное на частной теории относительности. *Квантовая* или *волновая* механика описывает явления микромира. Для систем из большого числа частиц была создана *статистическая механика*. Из механики в дальнейшем возникли гидродинамика, аэродинамика, теория машин и

механизмов, сопромат, инерционная навигация, теория автоматического регулирования, космическая динамика и другие.

В данном разделе рассматривается только история классической механики.

Истоки механики

Механика как наука зарождалась в результате простых наблюдений, накопления фактов, установления закономерностей в происходящих явлениях и формирования необходимых понятий. Анализ сведений и установление причинных связей – это следующий этап развития науки. Уже в древние века рассматривались перемещения, прямолинейные и криволинейные движения, сложение перемещений.

Аристотель оказал огромное влияние на все последующее развитие науки и философии. Он собрал и систематизировал огромный материал своих предшественников по всем областям знаний того времени. Глубоко осознав и критически переработав его, он разработал учение, которое изложил во многих своих сочинениях.

Аристотель – ученик Платона. 18-летним юношей (~ 366г. до н.э.) пришел в академию Платона сначала в качестве слушателя, а затем остался в ней в качестве одного из ведущих философов до 343г. (до н.э.), когда отправился в Стагир, чтобы стать воспитателем сына македонского царя Филиппа II, будущего Александра Македонского. В 335 г. д.н.э. Аристотель основал вблизи Афин первый университет – Ликей, где он организовал исследования и ежемесячно проводил симпозиумы, предвосхищая тем самым современные специальные школы. Основные сочинения Аристотеля и его научной школы (перипатетической школы): Логический свод "Органон" («Категории», «Об истолковании», «Аналитики», «1ая и 2ая Топика»), «Метафизика», «Физика», «О возникновении животных», «О душе», «Этика», «Политика», «Риторика», «Поэтика».

Сравнительно недавно были изданы труды Аристотеля в 4-х томах.: Физика; О небе; О возникновении и уничтожении; Метеоролика (Аристотель. Сочинения - М.: Мысль, 1981. – 613 с.)

Имеется достаточно обоснованная гипотеза о том, что не все дошедшие до нас трактаты написаны Аристотелем. Возможно, что часть из них написана его учениками...

Именно Аристотель ввел научный термин «Физика», означавший науку о природе. Однако он не стал основателем физики как науки, так как его объяснения физических явлений строились лишь на философских, умозрительных рассуждениях.

По сути дела, заглавием «Физика» можно было бы объединить не восемь книг, входящих в состав этого трактата, а все естественнонаучные сочинения Аристотеля, включая те из них, которые мы теперь относим к области биологии и психологии. Это связано с *очень широкой трактовкой Аристотелем движения*, что приводит к существенному отличию физики Аристотеля от содержания современной физики. Тем

не менее, **физика как наука впервые прозвучала в сочинениях Аристотеля.** Физика – механическое движение одно из видов движения вообще (превращение потенциального в действительное) Аристотель делит на два типа: «естественные» и «насильственные».

«Естественные» – круговые движения небесных тел вокруг *неподвижной и шарообразной* Земли. На самой Земле – это отвесные движения вверх и вниз абсолютно легких и абсолютно тяжелых тел.

Все остальные движения – «насильственные» – движения, которые происходят под действием других тел – «двигателей».

Аристотель отрицал существование пустоты в природе, потому что в пустоте нельзя выделить никакого направления, в ней нет движения и причин для его возникновения. Если бы в пустоте возникло движение, то из-за отсутствия сопротивления все тела двигались бы с бесконечной скоростью, а это невозможно. Аристотель подтвердил идею о шарообразности Земли

Велика его заслуга в создании логики.

Аристотель утверждал, что *«...надо идти от вещей [воспринимаемых] в общем, к их составным частям. ...То же самое некоторым образом происходит с именем в отношении к определению: имя, например, «круг» обозначает нечто целое, и притом неопределенным образом, а определение расчленяет его на части».* Это фиксация методологического подхода к изучению природы, – от общего к частному – который, развиваясь в трудах Рене Декарта, Галилео Галилея, Исаака Ньютона, станет ведущим подходом в физике до XX века и в большей части других естественных наук.

После смерти Аристотеля его ученики приводя в порядок труды учителя, поставили за книгой «Физика» еще 14 сочинений, оставшихся недоработанными. Они все их называли одним словом «Метафизикаа» (мета – за, после). Философ и теолог Св. Фома Аквинский (1226-1274): «Метафизика, т.е. то, что находится за пределами физики, постфизика, получила свое название благодаря нам, тем, кто естественным путем обрел знание вещей нематериальных через познание вещей разумных. Это дает нам право рассматривать метафизику в качестве объекта изучения после физики». Так сложилось, что благодаря усилиям в основном Св. Фомы Аквинского католическая церковь стала считать Аристотеля величайшим авторитетом по вопросам, не посредственно не связанным с ее догматами. В ун-ах Средневековья труды А. считались энциклопедией знаний, не требующие подтверждения экспериментом. В то время считалось, что если разрабатываемая физическая теория не согласуется с метафизическим учением, то она неверна. Однако сочинения А. по физике и «теории блуждающих планет» практически не содержали полезных и правильных сведений для последующих поколений ученых. Более того, они были тормозом на пути истинного развития науки.

Архимед. Первым и практически единственным ученым древности, кто ввел строгие доказательства в механике, в частности, в учение о равновесии тел, был Архимед.

Он родился в Сиракузах ~287 г. до н.э. Его отцом был астроном Фидий – родственник сиракузского царя Гиедона. Архимед получил хорошее образование, долгие годы, пробыв в Александрийском музее – уникальном научно-исследовательском центре античного мира.

Архимед – автор многих изобретений и открытий: машины для орошения полей, винта, рычага, блоков и винтов для поднятия больших тяжестей. *Разработал научные основы статики*, в частности, ввел понятие центра тяжести и момента относительно прямой и плоскости. Математически вывел законы рычага, сформулировал правила сложения параллельных сил. В сочинении «О плавающих телах» содержатся основные положения гидростатики, в том числе закон Архимеда. Ему приписывают знаменитое «Эврика» – нашел.

Подход Архимеда к физике построен на простых, но строгих геометрических доказательствах, позволяющих считать *Архимеда родоначальником последовательного использования математики в физике.*

Открытие законов движения планет

Важную роль в развитии механики играли астрономические открытия. Еще в древнем Египте и Вавилоне было установлено, что известные в то время семь светил и звезд (Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн), перемещаются относительно других звезд, положение которых не изменяется.

Учение о геоцентрической системе мира стало первой глобальной естественнонаучной революцией, преобразовавшей астрономию, космологию и физику. Начало этому учению положил еще древнегреческий ученый Анаксимандр, создавший в 6-м в. до н.э. довольно стройную систему кольцевых мироустроений. Однако последовательная геоцентрическая система была разработана в 4-м в. до н.э. величайшим ученым и философом древности Аристотелем, а затем, в 1-м в. *математически обоснована Птолемеем*. Геоцентрическую систему мира обычно называют *системой Птолемея*.

Переход от исходного эгоцентризма, а затем племенного или этнического топоцентризма к геоцентризму представлял собой первый шаг на пути формирования его как объективной науки. Действительно, при этом непосредственная видимая полусфера неба, ограниченная горизонтом, была дополнена аналогичной небесной полусферой до полной небесной сферы. Соответственно и сама Земля, занимающая центральное положение в этой сферической Вселенной, стала считаться шарообразной. Пришлось, таким образом, признать не только возможность существования антиподов – обитателей диаметрально противоположных пунктов земного шара, но и *принципиальную равноправность всех земных наблюдений мира*. Вопрос же о наблюдениях, наблюдателях является весьма важным с точки зрения формирования объективной научной картины мира.

Учение Птолемея. Великий астроном и математик *Клавдий Птолемей* (87 - 165) сделал выбор в пользу геоцентрической модели Мира. Он завершил начатое Гиппархом математическое описание движений небесных тел и блестяще выполнил программу Платона - «с помощью равномерных и правильных круговых движений спасти явления, представляемые планетами». Он пытался объяснить устройство Вселенной с учетом видимой сложности движения планет. Считая Землю шарообразной, а размеры ее ничтожными по сравнению с расстоянием до планет и тем более звезд, Птолемей, однако, вслед за Аристотелем утверждал, что Земля - неподвижный центр Вселенной.

В основе системы мира Птолемея лежат четыре постулата:

I. Земля находится в центре Вселенной.

II. Земля неподвижна.

III. Все небесные тела движутся вокруг Земли.

IV. Движение небесных тел происходит по окружностям с постоянной скоростью, т. е. равномерно.

Так как Птолемей считал Землю центром Вселенной, его система мира была названа *геоцентрической*. Вокруг земли, по Птолемею, движутся (в порядке удаленности от Земли) Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн, звезды. Но если движение Луны, Солнца, звезд круговое, то движение планет гораздо сложнее. Каждая из планет, по мнению Птолемея, движется не вокруг Земли, а вокруг некоторой точки. Точка эта в свою очередь движется по кругу, в центре которого находится Земля. *Круг, описываемый планетой вокруг движущейся точки, Птолемей назвал эпициклом, а круг, по которому движется точка около Земли, - деферентом.* Птолемей построил геоцентрическую модель Мира (по сути дела - модель солнечной системы), которая позволила объяснить все наблюдаемые особенности движения планет, Солнца и Луны, а главное, стала мощным инструментом для предсказания (предвычисления) положений этих небесных тел. Главный труд Птолемея – «*Большое математическое построение*», по гречески «*Μεγάλες μαθηματικὲς σύνταξις*», – еще в древности получил широкую известность под названием «*Μαγιστὴ σύνταξις*» («*Величайшее построение*»). Отсюда искаженный арабский вариант названия – «*Ал Магесте*», или «*Альмагест*», под которым этот 13-томный труд известен в современном мире. «*Альмагест*» – это подлинная энциклопедия астрономических знаний того времени, один из шедевров мировой научной литературы.

Учение Коперника. *Николай Коперник* - родился в Торуне на Висле в семье крупного купца, принадлежавшего к местной знати. Рано потеряв отца, он воспитывался у дяди, занимавшего высокие государственные посты в Вармийской епархии - самостоятельном церковном княжестве на территории западной Пруссии.

Коперник получил прекрасное образование. Три года он учился в крупнейшем в то время Ягемонском университете в Кракове. Затем в течение десяти лет совершенствовал свое образование в университетах Болоньи и Падуи. Он увлеченно занимался медициной, астрономией, математикой, философией, юридическими

науками. В 1503г. он получил диплом доктора права, обеспечивающий ему место каноника Вармийской епархии. В 1505г. Коперник вернулся на родину и с тех пор безвыездно жил и работал в Вармии до своей кончины.

Размышляя о Птолемеевой системе мира, Коперник поражался её сложности и искусственности. Изучая сочинения древних философов, особенно Никиты Сиракузского и Филолая, он *пришел к выводу, что не Земля, а Солнце должно быть неподвижным центром Вселенной*. При этом он сохранил идеальные круговые орбиты и считал даже необходимым сохранить эпициклы и деференты древних для объяснения неравномерности движений. Свою идею гелиоцентрической системы Коперник кратко сформулировал в 1515 г. не приводя детальных доказательств, дал в рукописном труде «Малый комментарий о гипотезах, относящихся к небесным движениям».

В нем Коперник вводит семь аксиом, которые позволят объяснить и описать движение планет значительно проще, чем в Птолемеевой теории. Аксиомы Коперника:

- орбиты и небесные сферы не имеют общего центра;
- центр Земли – не центр вселенной, но только центр масс и орбиты Луны;
- все планеты движутся по орбитам, центром которых является Солнце, и поэтому Солнце является центром мира;
- расстояние между Землёй и Солнцем очень мало по сравнению с расстоянием между Землёй и неподвижными звёздами;
- суточное движение Солнца — воображаемо, и вызвано эффектом вращения Земли, которая поворачивается один раз за 24 часа вокруг своей оси, которая всегда остаётся параллельной самой себе;
- земля (вместе с Луной, как и другие планеты), вращается вокруг Солнца, и поэтому те перемещения, которые, как кажется, делает Солнце (суточное движение, а также годичное движение, когда Солнце перемещается по Зодиаку) — не более чем эффект движения Земли;
- это движение Земли и других планет объясняет их расположение и конкретные характеристики движения планет.

Эти утверждения полностью противоречили господствовавшей на тот момент геоцентрической системе. Хотя, с современной точки зрения, модель Коперника недостаточно радикальна. Все орбиты в ней круговые, движение по ним равномерное, так что эпициклы пришлось сохранить — правда, их стало меньше, чем у Птолемея.

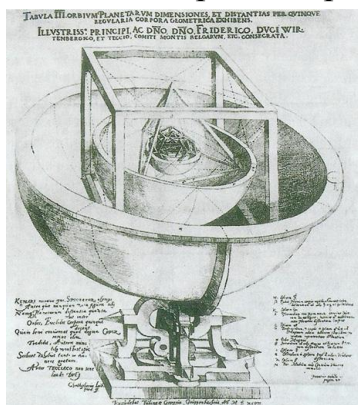
В 1530 – 1532 г.г. закончил сочинение «О вращении небесных сфер». Молодой математик Г. И Регик опубликовал в Гданьске труд Коперника анонимно. Успех книги убедил Коперника издать свой труд. Книга была выпущена в Нюрнберге в год смерти автора.

Модель мира Коперника была колоссальным шагом вперёд и сокрушительным ударом по архаичным авторитетам Аристотеля и Птолемея. Низведение Земли до

уровня рядовой планеты определённо подготавливало (вопреки Аристотелю) ньютоновское совмещение земных и небесных природных законов.

Он уверенно предсказал, что Венера и Меркурий имеют фазы, подобные лунным. После изобретения телескопа Галилей подтвердил это предвидение.

Законы Кеплера. Дальнейшее развитие гелиоцентрической системы связано с именем одного из творцов небесной механики Иоганном Кеплером. Он обладал чувством прекрасного. Всю свою сознательную жизнь он пытался доказать, что Солнечная система представляет собой некое мистическое произведение искусства. Сначала он пытался связать ее устройство с пятью *правильными многогранниками* классической древнегреческой геометрии. (Правильный многогранник — объемная фигура, все грани которой представляют собой равные между собой правильные многоугольники.) Сравнив свою модель с наблюдаемыми орбитами планет, Кеплер вынужден был признать, что реальное поведение небесных тел не вписывается в очерченные им стройные рамки.



Ранняя геометрическая модель Вселенной Кеплера: шесть орбитальных планетных сфер и пять вписанных правильных многогранников между ними.

Переехав в Прагу и став ассистентом знаменитого датского астронома Тихо Браге (Tycho Brahe, 1546–1601), Кеплер натолкнулся на идеи, по-настоящему обессмертившие его имя в анналах науки. Тихо Браге всю жизнь собирал данные астрономических наблюдений и накопил огромные объемы сведений о движении планет. После его смерти они перешли в распоряжение Кеплера. Эти записи, между прочим, имели большую коммерческую ценность по тем временам, поскольку их можно было использовать для составления уточненных астрологических гороскопов — сегодня об этом разделе ранней астрономии ученые предпочитают умалчивать.

Обработывая результаты наблюдений Тихо Браге, Кеплер столкнулся с проблемой, которая и при наличии современных компьютеров могла бы показаться кому-то трудноразрешимой, а у Кеплера не было иного выбора, кроме как проводить все расчеты вручную. Конечно же, как и большинство астрономов его времени, Кеплер уже был знаком с гелиоцентрической системой Коперника и знал, что Земля вращается вокруг Солнца, о чем свидетельствует и вышеописанная модель Солнечной системы. Но как именно вращается Земля и другие планеты? Представим проблему следующим образом: вы находитесь на планете, которая, во-первых, вращается вокруг своей оси, а во-вторых, вращается вокруг Солнца по неизвестной вам орбите. Глядя в небо, мы видим другие планеты, которые также движутся по неизвестным нам

орбитам. Наша задача — определить по данным наблюдений, сделанных на нашем вращающемся вокруг своей оси вокруг Солнца земном шаре, геометрию орбит и скорости движения других планет. Именно это, в конечном итоге, удалось сделать Кеплеру, после чего, на основе полученных результатов, он и вывел три своих закона! Это произошло в 1609-1619 гг.

Первый закон Кеплера утверждает, что орбиты планет представляют собой эллипсы, в одном из фокусов которых расположено Солнце. *Эксцентриситеты* (степень вытянутости) орбит и их удаления от Солнца в *перигелии* (ближайшей к Солнцу точке) и *апогелии* (самой удаленной точке) у всех планет разные, но все эллиптические орбиты роднит одно – Солнце расположено в одном из двух фокусов эллипса. Проанализировав данные наблюдений Тихо Браге, Кеплер сделал вывод, что планетарные орбиты представляют собой набор вложенных эллипсов. До него это просто не приходило в голову никому из астрономов. Историческое значение первого закона Кеплера трудно переоценить. До него астрономы считали, что планеты движутся исключительно по круговым орбитам, а если это не укладывалось в рамки наблюдений — главное круговое движение дополнялось малыми кругами, которые планеты описывали вокруг точек основной круговой орбиты.

Второй закон описывает изменение скорости движения планет вокруг Солнца. Чем дальше от Солнца уводит планету эллиптическая орбита, тем медленнее движение, чем ближе к Солнцу — тем быстрее движется планета.

В первых двух законах речь идет о специфике орбитальных траекторий отдельно взятой планеты.

Третий закон Кеплера позволяет сравнить орбиты планет между собой. В нем говорится, что чем дальше от Солнца находится планета, тем больше времени занимает ее полный оборот при движении по орбите и тем дольше, соответственно, длится «год» на этой планете.

Таким образом, Кеплер раскрыл кинематический аспект строения солнечной системы. Кеплер предложил понятие силы как причины ускорения. Существование эллиптических орбит приводило к выводу, что движение планет вызвано движением какой-то силы. Так возникла проблема силы гравитации.

Именно эти законы подготовили путь Ньютону, завершившему создание механики. Третий закон Кеплера играл и играет важную роль в современной космологии. С его помощью определяют угловые скорости галактик в целом.

Предшественники Ньютона

Галилео Галилей (1564-1642) Родился в Пизе в семье музыканта. В 1581г. отец отправил Галилея в Пизанский университет изучать медицину. Оставив учебу, вернулся во Флоренцию и в течение 4-х лет изучал самостоятельно математику. В 1589г. получил кафедру в Пизанском университете, а в 1592 стал профессором университета в Падуе, где работал до 1610 года. С 1610г. придворный философ,

математик и астроном у великого герцога Козимо II Медичи (бывшего ученика Галилео Галилея)

В 1632 г. «Диалог о двух главнейших системах мира - птолемеевой и коперниковой». В 1638 г. получил изданную в Лейдене книгу «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению». Прочитать не мог, т.к. к этому времени окончательно ослеп.

Галилей обосновал принцип относительности и доказал независимость ускорения свободного падения от состава и массы тела. Эти достижения часто считаются основным вкладом Галилея в физику. Однако не менее важно, а может быть и гораздо существенней, что место Галилея как основоположника научной физики определяется его ролью как методолога, провозгласившего значение эксперимента и математики, привлекаемой для доказательства выдвинутых гипотез. Следует добавить к этому списку построенный на экспериментальной базе индуктивный подход, четко проявившийся в утверждении независимости ускорения свободного падения от состава падающего тела. Утверждение, сделанное на основе ограниченного числа объектов.

Физика и механика в те годы изучались по сочинениям Аристотеля, которые содержали метафизические рассуждения о «первопричинах» природных процессов. В частности, Аристотель утверждал, что скорость падения пропорциональна весу тела, а движение происходит, пока действует «побудительная причина» (сила), и в отсутствие силы прекращается.

Находясь в Падуанском университете, Галилей изучал инерцию и свободное падение тел. В частности, он заметил, что ускорение свободного падения не зависит от веса тела, таким образом, опровергнув первое утверждение Аристотеля.

В своей последней книге Галилей сформулировал правильные законы падения: скорость нарастает пропорционально времени, а путь — пропорционально квадрату времени. В соответствии со своим научным методом он тут же привёл опытные данные, подтверждающие открытые им законы. Более того, Галилей рассмотрел и обобщённую задачу: исследовать поведение падающего тела с ненулевой горизонтальной начальной скоростью. Он совершенно правильно предположил, что полёт такого тела будет представлять собой суперпозицию (наложение) двух «простых движений»: равномерного горизонтального движения по инерции и равноускоренного вертикального падения. Галилей доказал, что любое брошенное под углом к горизонту тело летит по параболе. *В истории науки это первая решённая задача динамики.* В заключение исследования Галилей доказал, что максимальная дальность полёта брошенного тела достигается для угла броска 45° (ранее это предположение высказал Тарталья, который, однако, не смог его строго обосновать. На основе своей модели Галилей (ещё в Венеции) составил первые артиллерийские таблицы.

Галилей опроверг и второй из приведённых законов Аристотеля, сформулировав первый закон механики (закон инерции): при отсутствии внешних сил тело либо

покоится, либо равномерно движется. То, что мы называем инерцией, Галилей поэтически назвал «неистребимо запечатлённое движение». Правда, он допускал свободное движение не только по прямой, но и по окружности. Правильную формулировку закона позднее дали Декарт и Ньютон; тем не менее, общепризнанно, что само *понятие «движение по инерции» впервые введено Галилеем*, и первый закон механики по справедливости носит его имя.

Галилей является одним из основоположников *принципа относительности в классической механике*, который также был позже назван в его честь. В «Диалоге о двух системах мира» Галилей сформулировал принцип относительности следующим образом: Для предметов, захваченных равномерным движением, это последнее как бы не существует и проявляет своё действие только на вещах, не принимающих в нём участия.

Галилей опубликовал исследование колебаний маятника и заявил, что период колебаний не зависит от их амплитуды (это приблизительно верно для малых амплитуд). Он также обнаружил, что периоды колебаний маятника соотносятся как квадратные корни из его длины. Результаты Галилея привлекли внимание Гюйгенса, который изобрёл часы с маятниковым регулятором (1657); с этого момента появилась возможность точных измерений в экспериментальной физике.

Многие рассуждения Галилея представляют собой наброски открытых много позднее физических законов. Например, в «Диалоге» он сообщает, что вертикальная скорость шара, катящегося по поверхности сложного рельефа, зависит только от его текущей высоты, и иллюстрирует этот факт несколькими мысленными экспериментами; сейчас мы бы сформулировали этот вывод как закон сохранения энергии в поле тяжести. Аналогично он объясняет (теоретически незатухающие) качания маятника.

В статике Галилей ввёл фундаментальное понятие *момента силы* (итал. *momento*).

Рене Декарт (Кортезий) (1596 - 1649г.) - французский философ, физик, математик и физиолог. Родился 31.03.1596г. в Лаэ, близ Турина, в знатной, но не богатой семье. Отец считал, что детям следует дать образование, подобающее их дворянскому происхождению, поэтому отдал сына в иезуитский колледж Ла-Флеш, который тот закончил в 1616г., получив звание бакалавра и лиценциата права.

После окончания учебы он какое-то время предавался светской жизни, а потом поступил на военную службу сначала в армию Мориса Оранского, а затем курфюрста Баварского. Именно во время службы в качестве наемника Декарт начал размышлять над проблемами, которыми будет заниматься всю оставшуюся жизнь.

Почти семь лет (1619-1626) Декарт провел в скитаниях по Европе, набираясь жизненных впечатлений и размышляя над проблемами философии и математики. Обращение к математике не было случайным, поскольку Декарт пришел к выводу, что единственный путь познания – это использование строгого метода математики. У него возникает мысль создать всеобщую математику. Он решил ряд задач, касающихся

алгебраических уравнений и классификации плоских кривых. Вершиной этого направления его творчества стала «Геометрия» (1637), в которой были заложены основы аналитической геометрии. Именно Декарту принадлежит заслуга введения алгебраической символики - переменные x, y, z ; буквенные коэффициенты - a, b, c, d, \dots и обозначение степеней.

В 1637г. он издал сочинение «Рассуждение о методе, чтобы хорошо направлять свой разум и отыскивать истину в науках» с приложениями: «Диоптрика», «Метеоры», «Геометрия». В этом труде он сформулировал основные правила научного исследования:

1. Расчленение сложной проблемы на более простые последовательно до тех пор, пока не будут найдены далее неразложимые.

2. Неразрешенные проблемы следует сводить к решенным. Таким путем разыскивается решение простых проблем.

3. От решения простых проблем следует переходить к решению более сложных, пока не будет получено решение проблемы, которая была исходной при расчленении и является конечной в данном процессе.

4. После получения решения исходной проблемы необходимо обозреть все промежуточные, чтобы удостовериться, не пропущены ли какие – либо звенья. Если полнота решения установлена, то исследование заканчивается; если же обнаруживается пробел в решении, то необходимо дополнительное исследование в соответствии с перечисленными правилами.

Формально признавал важную роль опыта. Вместе с тем, когда объяснения Декарта не совпадали с опытными данными, он без всяких колебаний продолжал считать свои доказательства абсолютно «достоверными».

Декарт построил свою картину мира, основанную на представлении, что все пространство заполнено материей, находящейся в непрерывном движении (закон сохранения количества движения, 1644г.) В 1644г. впервые четко сформулировал закон инерции. В «Диоптрике» сформулировал законы отражения и преломления света (Снеллиус свои результаты 1621 г. не опубликовал (!) и гипотезу об эфире как переносчике света. Создал фантастическую вихревую теорию тяготения. Ошибся при решении задачи столкновения на основе сохранения количества движения. Поддерживал контакты с многими выдающимися учеными (И. Ферма, Б. Паскаль...)

Гюйгенс Христиан (14.04.1629–8.07.1695). Голландский физик, механик, математик и астроном. Родился в Гааге в знатной и богатой семье. Учился в университетах Лейдена (1645-47) и Бреда (1647-49). Получил юридическое образование. В 1665-1681 жил в Париже, был избран членом Парижской АН. С 1681г. - снова в Гааге. Его первые работы посвящены классическим математическим проблемам: «Теоремы о квадратуре гиперболы, эллипса и круга и центра тяжести их частей» и Открытия о величине круга», а трактат «О расчетах при азартной игре», написанный в 1657 г., является одной из первых работ по теории вероятности.

Сконструировал первые маятниковые часы со спусковым механизмом (1656), разработал их теорию и ряд проблем, связанных с ними (В трактате «Маятниковые часы», 1658 г.). В частности, *решил задачу об определении центра колебаний физического маятника*. В 1669 г. представил в Лондонское Королевское общество *подробное доказательство теорем, касающихся удара упругих тел и правила вычисления их скоростей после удара*. *Близко подошел к открытию закона всемирного тяготения*. Первый пришел к выводу о том, что Земля сжата у полюсов. *Высказал идею об измерении ускорения свободного падения с помощью маятника*. В небольшой работ «О центробежной силе», написанной вскоре после трактата «Маятниковые часы», дал подробный вывод формулы центробежной силы. Вывод звучит так.

«...Отсюда мы заключаем, что центробежные силы разных тел, движущихся по одинаковым кругам с одинаковой скоростью, относятся друг к другу, как веса тел или как количества материи. Как все весомые тела стремятся падать вниз с одинаковой скоростью и одинаковым ускоренным движением, и при том это стремление обладает тем большей силой, чем они больше, так должно быть и с теми телами, которые стремятся удалиться от центра, так как их стремление подобно тому, которое происходит от тяготения. Но в то время как стремление падать у одного и того же шара всегда одно и то же, всякий раз, когда он подвешен на нити, центробежное стремление разное в зависимости от скорости вращения».

ЭРА НЬЮТОНА

Исаак Ньютон (1643 – 1727). Формирование классической механики и основанной на ней механистической картины мира происходило по двум направлениям:

1) обобщение полученных ранее результатов и прежде всего законов движения свободно падающих тел, открытых Галилеем, а также законов движения планет, сформулированных Кеплером;

2) создание методов для количественного анализа механического движения в целом.

Известно, что Ньютон создал свой вариант дифференциального и интегрального исчисления непосредственно для решения основных проблем механики: определения мгновенной скорости как производной от пути по времени движения и ускорения как производной от скорости по времени или второй производной от пути по времени. Благодаря этому ему удалось точно сформулировать основные законы динамики и закон всемирного тяготения. Теперь *количественный подход* к описанию движения кажется чем-то само собой разумеющимся, но в XVIII в. это было крупнейшим завоеванием научной мысли. Для сравнения достаточно отметить, что китайская наука, несмотря на ее несомненные достижения в эмпирических областях (изобретение пороха, бумаги, компаса и другие открытия), так и не смогла подняться до установления количественных закономерностей движения. Решающую же роль в становлении механики сыграл, как уже отмечалось, *экспериментальный метод*, который обеспечил возможность проверять все догадки, предположения и гипотезы с помощью тщательно продуманных опытов.

С именем Ньютона связаны следующие понятия, принципы законы механики и другие достижения физической мысли. В 1687 вышел в свет основополагающий труд И. Ньютона **«Математические начала натуральной философии»**, содержащий основные понятия и аксиоматику механики, в частности *представления об абсолютном пространстве и абсолютном времени, понятие состояния, массы, закон пропорциональности силы ускорению и закон всемирного тяготения*. Исходя из последнего закона, Ньютон объяснил движения небесных тел, в результате чего стал возможен переход от кинематического описания солнечной системы к динамическому. Это окончательно утвердило победу учения Коперника.

В «Началах» также *была объединена земная механика с небесной*. Создалось впечатление, что законы механики управляют всеми процессами в природе. «Таким образом, Ньютон заложил основы той совокупности законов природы, которая дает возможность понять законы всех явлений, – писал А. Эйнштейн. – Ньютон считал, что этого можно достичь за счет сведения любых процессов к движениям частиц, которые взаимодействуют между собой».

Ньютон *построил первую физическую картину мира (механическую картину)* с абсолютным временем и пространством и концепцией дальнего действия, которая длительное время господствовала в науке. «...Ньютон был первым, кому удалось найти ясно сформулированную основу, из которой с помощью математического мышления можно было логически прийти к количественному согласующемуся с опытом описанию широкой области явлений», – отмечал А. Эйнштейн. Построенный Ньютоном фундамент физики оказался исключительно плодотворным и до конца XIX в. считался незыблемым. Поэтому год выхода в свет «Начал» можно считать этапным, приняв его за начало нового периода в истории физики – периода классической физики. Этот период длился два столетия, пока возведенная Ньютоном и его последователями величественная и грандиозная система под давлением новых фактов не начала рушиться.

Законы движения

Законы Ньютона – это поворотный момент в истории физической науки – блестящее обобщение всех накопленных к тому историческому моменту знаний о движении физических тел в рамках физической теории, которую теперь принято именовать *классической механикой*. Законы Ньютона, фактически, стали кульминацией долгого исторического процесса формулирования принципов классической механики. Мыслители и математики (достаточно упомянуть Галилея) веками пытались вывести формулы для описания законов движения материальных тел.

Однако они постоянно спотыкались на основополагающие идеи своего времени о принципах существования материального мира. Эти принципы настолько устойчиво вошли в сознание людей, что казались неоспоримыми. Например, древним философам даже в голову не приходило, что небесные тела могут двигаться по орбитам, отличающимся от круговых. В лучшем случае возникала идея, что планеты и звезды обращаются вокруг Земли по концентрическим (то есть вложенным друг в друга) сферическим орбитам. Причина в том, что еще со времен античных мыслителей Древней Греции *никому не приходило в голову, что планеты могут отклоняться от совершенства, воплощением которой и является строгая геометрическая окружность*. Впервые Иоганн Кеплер взглянул на эту проблему под другим углом, проанализировал данные реальных наблюдений и *вывел* из них, что в действительности планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим траекториям.

Основными понятиями механики, созданной Ньютоном, стали *масса, сила, пространство и время*.

Он дает определение массы: «Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и ее объему». Это определение массы вызвало в свое время споры, поскольку сама плотность определяется как масса

единицы объема, и, кроме того, такое определение ничего не говорит о способе ее измерения. Насколько выражен способ измерения в определении говорят слова Арнольда Зоммерфельда (1868-1951): «Словесные определения бессодержательны, истинные же определения даются указанием способа измерения, которое, вообще говоря, может быть осуществлено только теоретически и не обязательно практически». Сам Ньютон описал способ измерения массы в пояснении к третьему закону, рассмотрев столкновение двух тел, т.е. по сравнению взаимодействия тела с эталонным телом. Такая масса является количественной *мерой инертности тела*. Однако Ньютон ввел массу также в закон всемирного тяготения. Так возникло понятие *гравитационной массы*, которая может быть измерена по силе гравитационного взаимодействия между телами (по силе тяжести). Сам Ньютон показал равенство этих масс с точностью до 10^{-3} . В 1971 г. физики МГУ В.Б.Брагинский и В.И.Панов повысили точность измерений до 10^{-13} .

Ньютон дал определение *количества движения*: «Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе». Произведение массы на скорость является важной характеристикой движения. Вместе с тем название «количество движения» неудачно – не отражает векторного характера этой величины. В современной физике вместо «количества движения» используют термин «импульс» тела или частицы:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Для подхода к закону инерции Ньютон ввел определение силы.

Также он ввел понятия *абсолютного времени* и *абсолютного пространства*. «Абсолютное, истинное математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью». «Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным».

Понятия пространства и времени относятся к фундаментальным понятиям физики, и определения Ньютона вызвали в свое время ожесточенные споры. С созданием Эйнштейном теории относительности стало ясно, что пространство и время не существуют раздельно, они образуют пространственно-временной континуум.

Для Ньютона абсолютное пространство – это фактически та инерциальная система отсчета, относительно которой справедливы сформулированные им законы динамики. Приведем теперь все три закона механики, как сформулировал их сам Ньютон.

Первый закон Ньютона. Первый закон, который часто называют *законом инерции*, утверждает:

Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Этот закон, как отмечалось выше, был открыт еще Галилеем, который отказался от прежних наивных представлений, что движение существует лишь тогда, когда на тело действуют силы. Путем мысленных экспериментов он сумел показать, что по мере уменьшения воздействия внешних сил тело будет продолжать свое движение, так что при отсутствии всех внешних сил оно должно оставаться либо в покое, либо в равномерном и прямолинейном движении. Конечно, в реальных движениях никогда нельзя полностью освободиться от воздействия сил трения, сопротивления воздуха и других внешних сил. Поэтому закон инерции представляет собой идеализацию, в которой отвлекаются от действительно сложной картины движения и воображают себе картину идеальную, которую можно получить путем предельного перехода, т.е. посредством непрерывного уменьшения действия на тело внешних сил и перехода к такому состоянию, когда это воздействие станет равным нулю.

Первый закон Ньютона играет и еще одну важную роль с точки зрения нашего естествоиспытательского отношения к природе материального мира. Он подсказывает нам, что любое изменение в характере движения тела свидетельствует о присутствии внешних сил, воздействующих на него.

Второй закон Ньютона. Второй основной закон занимает в механике центральное место:

Изменение количества движения пропорционально приложенной действующей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Если первый закон Ньютона помогает нам определить, находится ли тело под воздействием внешних сил, то второй закон описывает, что происходит с физическим телом под их воздействием. Во-первых, это означает, что чем больше сумма приложенных к телу внешних сил, гласит этот закон, тем большее ускорение приобретает тело. Во-вторых, одновременно, чем массивнее тело, к которому приложена равная сумма внешних сил, тем меньшее ускорение оно приобретает. Интуитивно эти два факта представляются самоочевидными, а в математическом виде они записываются так:

$$F = ma,$$

где F – сила, m – масса, a – ускорение.

Это, наверное, самое полезное и самое широко используемое в прикладных целях из всех физических уравнений. Достаточно знать величину и направление всех сил, действующих в механической системе, и массу материальных тел, из которых она состоит, и можно с исчерпывающей точностью рассчитать ее поведение во времени.

Именно второй закон Ньютона придает всей классической механике ее особую прелесть – начинает казаться, будто весь физический мир устроен, как наиточнейший хронометр, и ничто в нем не ускользнет от взгляда пытливого наблюдателя. Стоит указать пространственные координаты и скорости всех материальных точек во Вселенной, словно говорит нам Ньютон, указать направление и интенсивность всех

действующих в ней сил, и можно однозначно предсказать любое ее будущее состояние. Такой детерминистский, т.е. механистический взгляд на природу вещей во Вселенной бытовал вплоть до появления *квантовой механики*.

Третий закон Ньютона. Третий закон сформулирован Ньютоном в следующем виде:

Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.

Закон этот гласит, что если тело А воздействует с некоей силой на тело В, то тело В также воздействует на тело А с равной по величине и противоположной по направлению силой. Иными словами, стоя на полу, вы воздействуете на пол с силой, пропорциональной массе вашего тела. Согласно третьему закону Ньютона пол в это же время воздействует на вас с абсолютно такой же по величине силой, но направленной не вниз, а строго вверх. Этот закон экспериментально проверить нетрудно: вы постоянно чувствуете, как земля давит на ваши подошвы.

Следует понимать и помнить, что речь у Ньютона идет о двух силах, каждая из которых воздействует на «свой» объект. Когда яблоко падает с дерева, это Земля воздействует на яблоко силой своего гравитационного притяжения (вследствие чего яблоко равноускоренно устремляется к поверхности Земли), но при этом и яблоко притягивает к себе Землю с равной силой. А то, что нам кажется, что это именно яблоко падает на Землю, а не наоборот, это уже следствие второго закона Ньютона. Масса яблока по сравнению с массой Земли низка до несопоставимости, поэтому именно его ускорение заметно для глаз наблюдателя. Масса же Земли, по сравнению с массой яблока, огромна, поэтому ее ускорение практически незаметно. Расчет показывает, что в случае падения яблока центр Земли смещается вверх на расстояние менее радиуса атомного ядра.

По совокупности три закона Ньютона дали физикам инструменты, необходимые для начала комплексного наблюдения всех явлений, происходящих в нашей Вселенной. Невзирая на все колоссальные достижения физики и науки в целом, произошедшие со времен Ньютона, чтобы спроектировать новый автомобиль или отправить космический корабль на Юпитер, приходится использовать все те же три закона Ньютона.

Закон всемирного тяготения. На склоне своих дней Исаак Ньютон рассказал, как это произошло: он гулял по яблоневому саду в поместье своих родителей и вдруг увидел луну в дневном небе. И тут же на его глазах с ветки оторвалось и упало на землю яблоко. Поскольку Ньютон в это самое время работал над законами движения, он уже знал, что яблоко упало под воздействием гравитационного поля Земли. Знал он и о том, что Луна не просто висит в небе, а вращается по орбите вокруг Земли, и, следовательно, на нее воздействует какая-то сила, которая удерживает ее от того,

чтобы сорваться с орбиты и улететь по прямой прочь, в открытый космос. Тут ему и пришло в голову, что, возможно, это одна и та же сила заставляет и яблоко падать на землю, и Луну оставаться на околоземной орбите.

Чтобы в полной мере оценить весь блеск этого прозрения, необходимо ненадолго вернуться к его предыстории. Когда великие предшественники Ньютона, в частности Галилей, изучали *равноускоренное движение* тел, падающих на поверхность Земли, они были уверены, что наблюдают явление чисто земной природы — существующее только недалеко от поверхности нашей планеты. Когда другие ученые, например Иоганн Кеплер, изучали движение небесных тел, они полагали что в небесных сферах действуют совсем иные законы движения, нежели законы, управляющие движением здесь, на Земле. История науки свидетельствует, что практически все аргументы, касающиеся движения небесных тел, *до Ньютона сводились в основном к тому, что небесные тела, будучи совершенными, движутся по круговым орбитам в силу своего совершенства, поскольку окружность — суть идеальная геометрическая фигура.* Таким образом, *выражаясь современным языком, считалось, что имеются два типа гравитации, и это представление устойчиво закрепились в сознании людей того времени. Все считали, что есть земная гравитация, действующая на несовершенной Земле, и есть гравитация небесная, действующая на совершенных небесах.*

Прозрение же Ньютона как раз и заключалось в том, что он объединил эти два типа гравитации в своем сознании. С этого исторического момента искусственное и ложное разделение Земли и остальной Вселенной прекратило свое существование. Результаты ньютоновских расчетов теперь называют *законом всемирного тяготения* Ньютона. Согласно этому закону между любой парой тел во Вселенной действует сила взаимного притяжения. Как и все физические законы, он облечен в форму математического уравнения. Если M и m — массы двух тел, а D — расстояние между ними, тогда сила F взаимного гравитационного притяжения между ними равна:

$$F = GMm/D^2$$

где G — гравитационная константа, определяемая экспериментально. В единицах СИ ее значение составляет приблизительно $6,67 \times 10^{-11}$.

Относительно этого закона нужно сделать несколько важных замечаний. *Во-первых*, его действие в явной форме распространяется на все без исключения физические материальные тела во Вселенной. В частности, сейчас вы и эта книга испытываете равные по величине и противоположные по направлению силы взаимного гравитационного притяжения. Конечно же, эти силы настолько малы, что их не зафиксируют даже самые точные из современных приборов, — но они реально существуют, и их можно рассчитать. Точно так же вы испытываете взаимное притяжение и с далеким квазаром, удаленным от вас на десятки миллиардов световых лет.

Во-вторых, сила притяжения Земли у ее поверхности в равной мере воздействует на все материальные тела, находящиеся в любой точке земного шара. Прямо сейчас на вас действует сила земного притяжения, рассчитываемая по вышеприведенной формуле, и вы ее реально ощущаете как свой *вес*. Если вы что-нибудь уроните, оно под действием всё той же силы равноускоренно устремится к земле. Галилею первому удалось экспериментально измерить приблизительную величину *ускорения свободного падения* вблизи поверхности Земли. Это ускорение обозначают буквой g . Для Галилея g было просто экспериментально измеряемой константой. По Ньютону же ускорение свободного падения можно *вычислить*, подставив в формулу закона всемирного тяготения массу Земли M и радиус Земли D , помня при этом, что, согласно второму *закону механики Ньютона*, сила, действующая на тело, равняется его массе, умноженной на ускорение. Тем самым то, что для Галилея было просто предметом измерения, для Ньютона становится предметом математических расчетов или прогнозов.

В-третьих, закон всемирного тяготения объясняет механическое устройство Солнечной системы, и *законы Кеплера*, описывающие траектории движения планет, могут быть выведены из него. Для Кеплера его законы носили чисто описательный характер – ученый просто обобщил свои наблюдения в математической форме, не подведя под формулы никаких теоретических оснований. В великой же системе мироустройства по Ньютону законы Кеплера становятся прямым следствием универсальных законов механики и закона всемирного тяготения. То есть мы опять наблюдаем, как эмпирические заключения, полученные на одном уровне, превращаются в строго обоснованные логические выводы при переходе на следующую ступень углубления наших знаний о мире.

Таким образом, третий закон описывает переход от описания движения тела, падающего исключительно под воздействием «земной» гравитации (ньютоновского яблока), к описанию движения спутника (Луны) по орбите, не изменяя при этом природы гравитационного воздействия с «земной» на «небесную». Вот это-то прозрение и позволило Ньютону связать воедино считавшиеся до него различными по своей природе две силы гравитационного притяжения.

Методология Ньютона. Ньютонova система мира. Пространство и время.

Следует отметить особенности методологии творчества Ньютона. Они в явной форме представлены в его «Правилах умозаключений в физике».

Правило I. «Не должно требовать в природе других причин, сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явления».

Правило II. «Поэтому, поскольку возможно, должны приписывать те же причины того же рода проявлениям природы».

Правило III. «Такие свойства тел, которые не могут быть ни усилены, ни ослаблены и которые оказываются присущими всем телам, над которыми можно производить испытания, должны быть почитаемы за свойства всех тел вообще».

Правило IV. «В опытной физике предложения, выведенные из совершающихся явлений с помощью общей индукции, несмотря на возможность противоречащих им предложений, должны приниматься за верные или в точности, или приближенно, пока не обнаружатся такие явления, которыми они еще более уточняются или же окажутся подверженными исключениям».

Теория гравитации была создана Ньютоном, открывшим закон всемирного тяготения. Лишь после этого открытия стал возможен научный подход к решению проблемы строения и эволюции Вселенной как целого. Стало возможным рассматривать весь Мир, всю Вселенную как один физический объект, как огромную массу вещества, распределенного в пространстве и подчиняющегося закону всемирного тяготения.

Центральные вопросы о Вселенной, на которые, так или иначе, пытались ответить мыслители всех времен, можно разбить на два блока:

1. Как изменяется, эволюционирует Вселенная со временем? Будет ли Мир существовать вечно в будущем? Существовал ли он всегда в прошлом?
2. Как организована Вселенная в пространстве? Есть ли у нее край (граница) и центр?

Как видно, первый блок вопросов связан со временем, а другой с пространством. Теория гравитации позволила конкретизировать эти вопросы:

- Что происходит с Вселенной, все части которой взаимодействуют между собой посредством гравитации?
- Можно ли с помощью теории гравитации сделать вывод о пространственном строении Вселенной?

Отвечая на эти вопросы, Ньютон создал стройную научную систему, которую по праву называют **системой мира Ньютона**. Система эта на протяжении более двух столетий владела умами ученых и формировала мировоззрение многих поколений людей. Каковы же главные черты системы мира Ньютона?

1. Стержень ньютоновской системы мира – **материальное единство** небесного и земного, то есть Мира в целом, который устроен и развивается в соответствии с законами Природы. (В системе мира Аристотеля подчеркивалось принципиальное различие небесного и земного, считалось, что небесные тела, в отличие от земных, подчиняются другим законам, состоят из другой субстанции). В современной картине мира это положение системы мира Ньютона остается неизменным.

2. В ньютоновской системе физическая картина Мира рисовалась абсолютными категориями: категориями абсолютного пространства и абсолютного времени. Абсолютное пространство существует независимо от времени и независимо от наполняющей его материи. Пространство – лишь сцена, на которой разворачиваются

события, немой и безучастный свидетель того, что происходит с материей. Время при этом течет размеренно и независимо ни от чего (абсолютное время). В XX в. этот элемент системы Ньютона претерпел коренное изменение. Современная физическая теория устанавливает глубокую и неразрывную взаимную связь между пространством, временем и материей, тем самым лишая эти категории абсолюта.

3. Для того чтобы ответить на вопрос о конечности или бесконечности Вселенной, Ньютон использовал в своих рассуждениях закон всемирного тяготения. В одном из своих писем (1692) он рассуждал так: «Если материя равномерно распределена в бесконечном пространстве, то она никогда не могла бы собраться в единую массу, но часть ее собралась бы в одну массу, часть – в другую, с тем, чтобы образовать бесконечное количество больших масс, рассеянных на значительных расстояниях друг от друга по всему бесконечному объему». Другими словами, в **конечной** Вселенной вся материя под действием сил тяготения рано или поздно слилась бы в единое тело. Напротив, в только **бесконечной** Вселенной могут существовать (и существуют) многочисленные равноправные центры гравитации (звезды). Только в этом случае рассеянная материя могла образовать (и образовала) «бесконечное количество больших масс» – звезд.

Аристотель за две тысячи лет до Ньютона рассуждал точно так же, однако пришел к прямо противоположному выводу. Аристотель стоял на позициях геоцентризма: Земля – центр Вселенной, следовательно, Вселенная не может быть бесконечной. Ведь бесконечное не может иметь ни центра, ни края. А поскольку центр во Вселенной существует (этот центр – Земля), Вселенная конечна.

4. Вселенная представлялась Ньютону вечной и неизменной (выражаясь современным научным языком – *стационарной*). Но эта вечность у Ньютона относилась к будущему, а не к прошлому Мира. Мир Ньютона имел **начало** во времени. Вопрос о происхождении Мира Ньютон решил так: «Изящнейшее соединение Солнца, планет и комет не могло произойти иначе, как по замыслу и по воле могущественного и премудрого существа », которое "управляет всем не как душа Мира, а как властелин Вселенной ", ибо "от слепой необходимости Природы, которая всюду и везде одна и та же, не может происходить изменение вещей».

Идея вечной и неизменной (стационарной) Вселенной весьма привлекательна с эстетической и философской точек зрения. Эйнштейн, творец современной теории гравитации (названной им «общей теорией относительности» – ОТО), упорно искал именно стационарные решения уравнений ОТО. Лишь через несколько лет после появления этой теории было показано, что из уравнений ОТО неизбежно следует *нестационарность* Вселенной (А.Фридман, 1924). Все это тем более удивительно, что вывод о нестационарности Вселенной мог быть сделан уже на основании теории Ньютона.

РАЗВИТИЕ МЕХАНИКИ ПОСЛЕ НЬЮТОНА

После установления Ньютоном основных понятий и законов механики механика развивалась по нескольким основным направлениям. Некоторые из них были намечены еще до Ньютона.

В первую очередь рассмотрим направление, заключающееся в разработке *аналитического аппарата, основанного на принципе ускоряющих сил* – так называл это направление Лагранж. Это направление предполагает прямое применение второго закона Ньютона для определения движения материальной точки, системы материальных точек или твердого тела по заданным силам или же, наоборот, определение сил по заданным движениям.

Такого рода задачи как раз и решал *Ньютон*, однако он не разработал *аналитический аппарат для их решения*. Ньютон не использовал аналитический аппарат дифференциального и интегрального исчисления в явном виде, а применял геометрический метод. Он заключался в том, что механические величины выражались в виде различных геометрических величин и соотношений между ними, т. е. соотношений между отрезками, кривыми, касательными, углами и т. д. Решения конкретных задач у Ньютона выглядели весьма искусственно, каждая задача решалась своим способом. По этому поводу Эйлер писал: *«Хотя читатель и убеждается в истине выставленных предложений, но он не получает достаточно ясного и точного их понимания, так что, если чуть-чуть изменить те же самые вопросы, он едва ли будет в состоянии разрешить их самостоятельно»*.

В построении аналитического аппарата, основанного на принципе ускоряющих сил, основная роль принадлежит петербургскому академику **Леонарду Эйлеру (1707-1783)**. Эйлер (швейцарец по национальности) был приглашен в Петербургскую Академию наук в 1727 г., где проработал до 1741 г., после чего уехал в Германию. В 1766 г. он вновь вернулся в Россию и прожил в Петербурге до своей смерти. Эйлеру принадлежит огромное количество трудов. В 1736 г. была издана «Механика» – сочинение в двух томах, а в 1705 г. – «Теория движения твердых тел». В этих сочинениях Эйлер опубликовал значительную часть своих исследований по механике. Эйлер следует Ньютону в понимании основной задачи механики, а также ее основных понятий. Однако в отличие от последнего он не отказывается от обсуждения вопроса о природе силы. Он полагает, что всякое взаимодействие, в конечном счете, должно сводиться к контактному. Сущность силы, по Эйлеру, заключена в основных свойствах материи: инерции и непроницаемости. Когда два тела движутся навстречу друг другу и соприкасаются, то вследствие непроницаемости, с одной стороны, и в результате стремления сохранить свое движение, с другой стороны, их движение должны измениться.

Эйлер разработал *аналитический аппарат механики материальной точки*, которую он определяет как частицу материи, имеющую очень малые размеры («тельце», по терминологии Эйлера). Первоначально Эйлер решил задачу для прямолинейного движения материальной точки. Он свел эту задачу к решению дифференциального уравнения

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Если известна сила F как функция x , то интегрирование этого уравнения при заданных начальных значениях дает решение задачи. Затем Эйлер переходит к более общим случаям движения материальной точки, применяя различные способы разложения движения на составляющие.

Эйлер явился основоположником *механики твердого тела*. Он впервые вывел уравнение движения твердого тела с помощью так называемых углов Эйлера. Именно Эйлер ввел в механику основные понятия динамики твердого тела: *момент инерции*, *свободные оси* и другие.

Создание аналитического аппарата механики, основанного на принципе ускоряющих сил, не могло полностью удовлетворить потребности этой науки. Причины в том, что многие проблемы, стоявшие перед механикой, только лишь теоретически сводились к основной задаче динамики Ньютона, а решение их с помощью принципа ускоряющих сил было как минимум достаточно трудно. Например, принцип ускоряющих сил применим непосредственно при решении вопросов небесной механики, баллистики, движения корабля, т.е. *в случаях, когда значения сил, действующих на тело, заранее известны*. Совсем по другому обстояло дело с проблемами движения или равновесия системы тел, подверженных связям, а также тел, сталкивающихся друг с другом. Лагранж писал: *«Эти задачи состоят в определении движения тел, тяжелых или лишенных тяжести, которые толкают или тянут друга с помощью нитей или негибких рычагов, к которым они неподвижно прикреплены или вдоль которых они могут свободно скользить, после сообщения им каких-либо импульсов, представляются затем самим себе или принуждаются двигаться по заданным кривым линиям или поверхностям»*.

Интерес к таким задачам в 18 веке был и чисто технический, связанный с расчетом различного рода механизмов (мануфактурное производство, прежде всего). К таким задачам нельзя было непосредственно применить принцип ускоряющих сил, так как сами силы не заданы, а их следовало определить.

Такое положение заставляло искать другие способы, заключавшиеся в разработке общих методов решения таких задач, основанных не только на принципе ускоряющих сил. В процессе поисков сформировалось направление в механике, основанное на применении *законов сохранения*.

К этому времени законы сохранения уже были известны:

1. закон сохранения количества движения (установлен Декартом);

2.закон сохранения живых сил или в современном понимании закон сохранения энергии (Галилей, Лейбниц – в общем виде);

3.закон сохранения количества движения (установлен в 1746 г. почти одновременно Эйлером и Д.Бернулли при разработке теории вращательного движения).

Законы сохранения в 18 веке выдвигались как всеобщие законы природы. В последующем были сведены до ранга общих законов механики или принципов, следствий, не имеющих фундаментального, универсального значения. Однако позже по мере развития науки они вновь приобрели принципиальное значение и получили окончательный смысл *общих законов природы*. Они как оказалось применимы и к не механическим формам движения материи, например, электромагнитному полю. Наконец еще позже они приобрели смысл законов, выражающих общие свойства пространства и времени.

Следующее направление в развитии аналитической механики началось с появлением принципа сведения задач на движение к задачам равновесие. Первый шаг здесь принадлежит Якобу Бернулли (1654-1705). Он свел задачу колебаний физического маятника к задаче на равновесие. Примерно также принцип сведения задач на движение к задачам на равновесие применил в 1716 г. Герман.

Наконец в 1743 году французский математик, физик и философ **Жан Даламбер (1717-1783)** напечатал книгу «Динамика», в которой предложил несколько иной принцип сведения задач динамики к задаче статики. Он считал основным понятием динамики движение. Отрицательно относился к системе механики Ньютона, основанной на принципе ускоряющих сил, так как считал, что понятие силы вообще должно быть исключено из механики, а следует основываться только на понятии движения. Поэтому он не считал второй закон Ньютона основным законом механики. В основе механики, по его мнению, лежат три основных положения: закон инерции, закон сложения движения и принцип равновесия. Принцип, предложенный Даламбером, получил название «принципа потерянных сил». Даламбер (1742 г.) рассмотрел общий случай механической системы со связями и показал, что должна существовать эквивалентность между реальными силами, приложенными к системе, и силами, которые были бы необходимы, если бы связей не было, чтобы система совершала то же самое движение. Если написать соответствующее условие равновесия – в этом и состоит «принцип Даламбера», – то силы действия связей, вообще говоря неизвестные, оказываются исключенными. Отсюда следует, что каждая задача динамики может быть сведена в некотором смысле к задаче равновесия, т. е. к статике.

В действительности этот принцип был применен еще в 1703 г. Якобом Бернулли (1654-1705) при рассмотрении физического маятника и выводится из ньютоновской механики. Заслуга Даламбера состоит в том, что он увидел необычайную плодотворность этого принципа и поэтому основал свою динамику на этом принципе, принципе инерции и принципе параллелограмма сил. Из множества задач, решенных Даламбером таким способом, упомянем задачу о столкновении, решенную им без

применения теоремы о живой силе, и ставшие знаменитыми расчеты (1749 г.) предварения равноденствий и нутации земной оси, хотя оба эти расчета и были выполнены ранее (1745 г.) Эйлером без применения принципа Даламбера.

Дальнейшее развитие в механике рассматриваемое направление получило в трудах **Жозефа Лагранжа (1736-1813)**. Лагранж ставил перед собой цель разработать такой аппарат механики, который давал бы возможность привести решение любой механической задачи к решению дифференциальных уравнений. Лагранж так описал свою цель: *«Мне предстоит свести теорию механики и искусство решения относящихся к ней задач к общим формулам, простая детализация которых дает все уравнения, необходимые для решения любой задачи... С другой стороны, этот труд будет полезен также тем, что он объединит и представит с единой точки зрения различные принципы, применяемые и сейчас для облегчения решения механических задач, покажет их связь и взаимозависимость и упорядочит их так, чтобы можно было судить о степени их точности и общности»*.

Но главной заботой Лагранжа было исключение из рассмотрения всяких ссылок на геометрические представления. В основу статики Лагранж положил принцип возможных перемещений, разработал математический аппарат для его применения в случае системы тел со связями. В основу динамики Лагранж положил принцип сведения задач динамики к задачам статики в форме Германа-Эйлера. Смысл использования этих принципов Лагранжа в том, что после сведения задачи динамики к задаче статики к последней можно применить принцип возможных перемещений и, таким образом, привести механическую задачу к задаче математической. Математический талант Лагранжа и ясность идей позволили ему достичь намеченных целей в почти совершенном труде по классической механике; рассмотрение основано на принципе Даламбера в сочетании с принципом виртуальных перемещений и приводит к известным динамическим уравнениям Лагранжа и к основным уравнениям динамики систем, лежащим в основе механики и современной классической физики. Эти уравнения в настоящее время, как известно, записывают в виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0,$$

Где $L = T - U$ – функция Лагранжа, или лагранжиан; q_i – обобщенные координаты, T – живая сила, выраженная в этих координатах; U – функция координат, которая позже получила название потенциальной энергии.

Развитие вариационных принципов механики

До определенного момента механику устраивали принципы, о которых мы уже говорили. Эти принципы относятся к *невариационным принципам* механики. Они непосредственно устанавливают закономерности движения, совершаемого системой

под действием приложенных к ней сил. К этим принципам относятся, например, 2-й закон Ньютона, согласно которому при движении любой точки системы произведение её массы на ускорение равно сумме всех приложенных к точке сил, а также принцип Д'Аламбера.

Невариационные принципы справедливы для любой механической системы и имеют сравнительно простое математическое выражение. Однако их применение ограничено только рамками механики, поскольку в выражения принципов непосредственно входит такое чисто механическое понятие, как сила. Существенно также следующее. В большинстве задач механики рассматривается движение несвободных систем, т.е. систем, перемещения которых ограничены связями. Примерами таких систем являются всевозможные машины и механизмы, где связями являются подшипники, шарниры, тросы и т. п., а для наземного транспорта – ещё и полотно дороги или рельсы. Чтобы изучить движение несвободной системы, исходя из невариационных принципов, надо эффект действия связей заменить некоторыми силами, называемыми *реакциями связей*. Но величины этих реакций заранее неизвестны, поскольку они зависят от того, чему равны и где приложены действующие на систему заданные (*активные*) силы, такие, например, как силы тяжести, упругости пружин, тяги и т. п., а также от того, как при этом движется сама система. Поэтому в составленные уравнения движения войдут дополнительные неизвестные величины в виде реакций связей, что обычно существенно усложняет весь процесс решения.

Преимущество вариационных принципов состоит в том, что из них сразу получаются уравнения движения соответствующей механической системы, не содержащие неизвестных реакций связей. Достигается это тем, что эффект действия связей учитывается не заменой их неизвестными силами (реакциями), а рассмотрением тех перемещений или движений (или же приращений скоростей и ускорений), которые точки этой системы могут иметь при наличии данных связей.

Содержание *вариационных принципов* состоит в том, что они устанавливают свойства (признаки), позволяющие отличить истинное, то есть фактически происходящее под действием заданных сил, движение механической системы от тех или иных кинематически возможных её движений (или же состояние равновесия системы от других возможных её состояний). Обычно эти свойства (признаки) состоят в том, что для истинного движения некоторая физическая величина, зависящая от характеристик системы, имеет наименьшее значение по сравнению с её значениями во всех рассматриваемых кинематически возможных движениях. При этом вариационные принципы могут отличаться друг от друга видом указанной физической величины и особенностями рассматриваемых кинематически возможных движений, а также особенностями самих механических систем, для которых эти принципы справедливы. Использование вариационных принципов требует применения методов вариационного исчисления.

По форме вариационные принципы разделяют на два типа. Это – *дифференциальные*, в которых устанавливается, чем истинное движение системы отличается от движений кинематически возможных в каждый данный момент времени, и *интегральные*, в которых это различие устанавливается для перемещений, совершаемых системой за какой-нибудь конечный промежуток времени.

К основным дифференциальным вариационным принципам относятся:

- *принцип возможных перемещений*, устанавливающий условие равновесия механической системы с идеальными связями; согласно этому принципу, положения равновесия механической системы отличаются от всех других возможных для неё положений тем, что только для положений равновесия сумма элементарных работ всех приложенных к системе (активных и реактивных) сил на любом возможном перемещении системы равна нулю.
- *принцип Д'Аламбера - Лагранжа*, согласно которому истинное движение механической системы с идеальными связями отличается от всех кинематически возможных движений тем, что только для истинного движения в каждый момент времени сумма элементарных работ всех приложенных к системе активных, реактивных и инерционных сил на любом возможном перемещении системы равна нулю. В этих вариационных принципах рассматриваемой физической величиной является работа сил.

К интегральным вариационным принципам относятся *принципы наименьшего (стационарного) действия*, согласно которым истинным среди рассматриваемых кинематически возможных движений системы между двумя её положениями является то, для которого физическая величина, называемая действием, имеет минимальное значение. Разные формы этих принципов отличаются друг от друга выбором величины действия и особенностями сравниваемых между собой кинематически возможных движений системы. Применяются вариационные принципы как для составления в наиболее простой форме уравнений движения механических систем, так и для изучения общих свойств этих движений. При соответствующем обобщении понятий они используются также в *механике сплошных сред, термодинамике, электродинамике, квантовой механике, теории относительности* и др.

Принцип «наименьшего количества действия» предложил **Пьер Мопертюи (1698-1759)**. Следующий важный шаг в развитии вариационных принципов был сделан **Уильямом Гамильтоном (1805-1865)**. Гамильтон предложил новую форму вариационного принципа механики. Итак, принцип наименьшего действия Гамильтона можно сформулировать следующим образом. Действие S для истинного движения материальной точки, траектория которого в начальный и конечный моменты времени проходит через две определенные точки, принимает минимальное значение по сравнению с любыми виртуальными движениями, траектории которых в указанные моменты времени проходят через те же две точки.

Кратко остановимся на роли, которую сыграли вариационные принципы в развитии физики. После формулировки вариационных принципов в форме Мопертюи

и Гамильтона были предложены и другие вариационные принципы механики. Их общее значение заключалось в том, что с их помощью удавалось единым методом получать уравнения движения сложных механических систем. В дальнейшем было показано, что вариационные принципы возможны и в других разделах физики, например в *электродинамике и специальной теории относительности*.

Таким образом, начиная с конца XIX в принцип наименьшего действия играет в физике все большую и большую роль как общезначимый принцип. Выявляется, что с его помощью можно просто и изящно сформулировать в математической форме основные законы многих общих физических теорий. Для этого нужно только определить переменные, которые следует взять за основу этой теории, и найти выражение соответствующего кинетического потенциала, или лагранжиана. Тогда одно уравнение, выражающее вариационный принцип, заменит множество математических соотношений данной теории. Открытие теории относительности еще больше укрепило значение принципа наименьшего действия, так как оказалось, что действие является релятивистским инвариантом. Вместе с этим и формулировка основных математических соотношений какой-либо физической теории с помощью принципа наименьшего действия также релятивистски инвариантна. Некоторые физики начинают рассматривать принцип наименьшего действия как один из самых фундаментальных принципов физики. Так, например, Планк считал этот принцип важнейшим физическим принципом, даже более важным, нежели принцип сохранения энергии. В статье «Принцип наименьшего действия», относящейся к 1915 г., он писал, что в достижении цели обобщения всех физических законов в некоем едином принципе принцип наименьшего действия играет особую роль.

Гамильтонова форма уравнений движения оказалась наиболее удобной и целесообразной при рассмотрении системы многих частиц и построении *статистической механики*. В теории систем многих частиц предполагается, что каждая из N частиц системы описывается шестью динамическими переменными (без учета внутренних степеней свободы) \vec{q}_i, \vec{p}_i . Эти переменные американский физик Джозайя Уиллард Гиббс (1839-1903) назвал *фазой*.

Гиббс ввел фазовое пространство одной частицы (фазовое μ -пространство). Совокупность фаз всех частиц образует фазовое Γ -пространство. Динамическое состояние системы частиц в таком пространстве изображается точкой. По мере движения частиц изображающая точка описывает фазовую траекторию, которая полностью определяется положением изображающей точки в начальный момент времени и заданием функции Гамильтона всей системы. Ясно, что решить систему огромного числа канонических уравнений практически невозможно даже при использовании современной компьютерной техники. Но если бы это было и возможно, то все равно задание начальных фаз каждой из частиц совершенно не выполнимо. Поэтому в статистической механике используется идея представляющих ансамблей, которую предложил Гиббс в 1903 г. Ансамбль Гиббса – это бесконечная совокупность совершенно одинаковых механических систем, которые отличаются друг от друга

только начальными условиями. Ансамбль Гиббса можно представить как «облако» в фазовом Г-пространстве. В соответствии с этим вводится плотность в фазовом пространстве, эволюция которой описывается *уравнением Лиувилля*. Это уравнение составляет основу современной статистической физики неравновесных состояний.

Гиббс придавал большое значение системе обозначений в физике. Именно он ввел точку и крест для обозначения скалярного и векторного произведений векторов. Он писал: *«Если я достиг каких-то успехов в математической физике, то это, как я думаю, произошло потому, что я смог преодолеть математические трудности»*.

Изложение механики упростило и сделало более понятным введение *векторного исчисления*. Гамильтон ввел в 1843 г. ввел понятие «кватернионы», являющееся обобщением понятия комплексного числа, а в 1847 г. ввел термин «вектор». В дальнейшем немецкий математик Герман Грассман (1809-1877) создал векторное исчисление.

Проблемы механики сплошных сред

Идеи механики системы материальных точек были обобщены и применены в случае сплошных сред – жидкостей, газов, твердых тел. Были созданы гидродинамика и газовая динамика, а также аэродинамика и теория упругости. Первую математическую модель течения жидкости построил Эйлер. Он в 1755 г. предложил систему уравнений (уравнения Эйлера), которые используются и в современной механике идеальной жидкости. В гидродинамике жидкость (и газы) рассматриваются как сплошная среда, не имеющая структуры. С кинетической точки зрения это значит, что всякий малый элемент объема жидкости считается настолько большим, что он содержит очень большое число молекул. Точнее, рассматривается «физически бесконечно малый объем», который мал по сравнению со всем объемом жидкости, но размеры которого велики по сравнению с межмолекулярными расстояниями. Когда говорят о смещении некоторой частицы жидкости, то предполагают смещение не отдельной молекулы жидкости, а целого элемента объема, содержащего много молекул.

Уравнения гидродинамики представляют собой систему, основанную на законах сохранения: закон сохранения массы жидкости (уравнение непрерывности), закон сохранения импульса (уравнения движения) и закон сохранения энергии. Эффекты вязкости впервые учли французский физик Навье (1785-1836) в 1822 г. и независимо английский физик и математик Стоке (1819-1903) в 1845 г. Уравнения движения вязкой жидкости называют их именем.

Триумфом механики сплошных сред стала аэродинамика благодаря блестящим успехам самолетостроения. В России аэродинамика развивалась «отцом русской авиации» Н.Е.Жуковским (1847-1921) и его учениками С.А.Чаплыгиным (1869-1942), В.П. Ветчинкиным (1888-1950), А.Н. Туполевым (1888-1972) и др.

Решение задач о стационарном движении жидкости и о стационарном обтекании тел естественно привело к проблеме устойчивости в гидродинамике, поскольку не всякое даже точное решение уравнений движения может реально осуществиться в природе. По характеру движения жидкостей и газов различают два вида: ламинарные течения, спокойные и плавные, и турбулентное движение. Ламинарные течения наблюдаются, например, в тонких капиллярных трубках или при движении очень вязких жидкостей (подсолнечное масло, сахарный сироп). Турбулентное движение возникает при потере устойчивости, и оно чаще всего происходит в природе (в атмосфере, реках и морях), в лабораторных условиях (например, в плазме) и в технике (при транспортировке нефти по трубам, при теплосъеме с атомных реакторов и МГД-генераторов, в химической промышленности и т.д.). Переход из ламинарного режима движения в турбулентный осуществляется при достаточно больших скоростях и при достаточно больших масштабах явления. При этом существенно качество самой жидкости (или газа), т.е. ее плотность и вязкость. Эти четыре параметра английский физик Осборн Рейнольдс (1842-1912) в 1883г. объединил в одно безразмерное число, называемое *числом Рейнольдса*. При небольшом значении числа Рейнольдса движение ламинарно. Как только число Рейнольдса превосходит критическое значение, течение становится турбулентным. Развитие турбулентности является результатом противоборства двух сил - сил инерции и сил вязкости. Силы инерции увлекают и сталкивают друг с другом частицы жидкости, а силы вязкости тормозят относительное перемещение частиц и стремятся сгладить нерегулярные движения потока. Когда силы инерции превосходят силы вязкости, то возникает турбулентность. Характерным признаком турбулентности являются беспорядочные колебания в точке наблюдения параметров движущейся жидкости - скорости, давления, плотности и т.п. В разных точках пространства беспорядочные колебания никак не связаны друг с другом. Эти флуктуации параметров обусловлены тем, что в потоке все время возникают, перемещаются и затухают вихри самых разных размеров. Из крупных завихрений рождаются более мелкие, которые порождают еще меньшие завихрения и так далее, пока не станут проявляться эффекты вязкости. Возникает своеобразная иерархия вихрей. Строгая математическая модель турбулентности сталкивается с трудностью, которая состоит в том, что число неизвестных, описывающих турбулентное движение, оказывается больше, чем число уравнений. Преодолевается с помощью статистического метода описания.

Явление турбулентности используется в физике плазмы, но только его смысл там более широкий.

Современная классическая механика

После создания теории относительности и квантовой теории стали совершенно понятными границы применимости классической механики, основанной на уравнениях Ньютона и их обобщениях. Вместе с тем в границах своей применимости

классическая механика является могучим инструментом в решении многочисленных практических задач. Достаточно лишь вспомнить, что полеты космических кораблей обеспечиваются расчетами методами классической механики. Как и всякая наука, механика опирается на некоторые первичные понятия, как это и делал Ньютон. Перечислим основные понятия современной классической механики.

1. Пространство является однородным трехмерным, евклидовым; оно описывается евклидовой метрикой, не зависящей от каких-либо физических объектов, в частности, от массы.

2. Время одномерно, оно измеряется по движению тел. За одну секунду принимается промежуток времени, за который происходит 9 192 631 770 периодов излучения, отвечающего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния цезия-133 (согласно резолюции 13 Генеральной конференции по мерам и весам, 1967 г.). Время во всех системах одинаково и не зависит от скорости тела, на котором оно измеряется.

3. Существует хотя бы одна система отсчета, в которой выполняется второй закон Ньютона. Такая система называется инерциальной. Доказывается, что любая система отсчета, движущаяся относительно инерциальной системы поступательно, прямолинейно и равномерно, также является инерциальной (принцип относительности Галилея).

4. Масса является характеристикой тела, она постоянна, не зависит от скорости движения тела и от вещества, из которого оно сделано. Материальной точкой считается геометрическая точка, имеющая конечную массу.

5. Сила возникает в результате взаимодействия тел. Она вызывает ускорение этих тел или их деформацию. Сила является векторной величиной.

6. Принцип причинности. Задание динамических переменных механической системы (совокупность координат и скоростей, или импульсов) в начальный момент времени однозначно определяет все движение системы в любой последующий момент времени. Наш мир таков, что эти переменные полностью определяют состояние механической системы, и нет необходимости задавать другие величины, например, ускорение. Это есть экспериментальный факт.

Современная классическая механика имеет хорошо разработанные аналитические и численные методы решения самых разнообразных практических задач, и многие современные математические теории возникли из проблем механики. Эти абстрактные теории, доведенные до полного совершенства, в свою очередь, применяются при изложении механики.

Уравнения Ньютона позволяют точно решать и исследовать многие важные задачи, например, движение в центральном поле сил. Однако точное решение большинства задач является скорее исключением, чем правилом, поэтому были разработаны различные достаточно эффективные приближенные методы. Среди таких методов наиболее важными являются асимптотические методы, основанные на теории возмущений, разделении быстрых и медленных движений и усреднении по быстрым

осцилляциям. Асимптотические методы были разработаны русскими математиками Николаем Митрофановичем Крыловым (1879-1955), Николаем Николаевичем Боголюбовым (1909-1992) и многими другими учеными. Эти методы особенно успешно применяются в теории нелинейных колебаний. Систематические исследования нелинейных колебаний начались с работы Пуанкаре «*О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями*» (1880). Пуанкаре ввел особые точки и дал им определения: *центр, седло, фокус* и *узел*. Он указал также на возможность *предельных циклов*. Нахождение особых точек и анализ траекторий в фазовом пространстве являются мощным средством изучения нелинейных колебаний. В 1928 г. русский ученый А.А. Андронов (1901-1952) показал, что фазовые траектории при устойчивом предельном цикле Пуанкаре приближаются к нему как снаружи, так и изнутри. В результате этого возникают устойчивые колебания, которые Андронов назвал *автоколебаниями*.

В механике динамических систем выявилась важная роль двойственных проблем, таких как линейность - нелинейность, случайность - закономерность, устойчивость - неустойчивость, коллапс - взрыв, детерминизм - неопределенность, дискретность - непрерывность, регулярность - сингулярность и т.д. Решение многих вопросов такого типа дается в рамках нового направления в механике - *стохастической динамики* (см.: *Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика.* - М., 1984; *Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах.* - М., 2004).

При анализе нелинейных динамических систем разной природы последнее время успешно используется новый метод, так называемый *вейвлетный анализ*, возникший в 1984 г. Понятие «вейвлет» (*маленькая волна*) является обобщением преобразования Фурье. Вейвлетный анализ наиболее эффективен в тех случаях, когда в сигнале возникают или исчезают гармоники, или частота гармоник плавно изменяется с течением времени. Такая ситуация может реализоваться при переходе динамической системы от периодического режима движения к хаотическому.

Исследования нелинейных движений непосредственно связаны с проблемой устойчивости этих движений. Проблема устойчивости движения является чрезвычайно важной не только в механике и в физике, но и в электротехнике, радиофизике, астрономии, химии и в технике. Наиболее важные результаты в теории устойчивости принадлежат Ляпунову. До Ляпунова теория устойчивости движения строилась в линейном приближении. Он впервые показал, что необходимо рассматривать полные дифференциальные уравнения возмущенного движения. Впоследствии теоремы Ляпунова об устойчивости движения были обобщены (Н.Г. Четаев и др.). Теория устойчивости движения, имеющая многочисленные важные приложения (ускорение заряженных частиц, космические полеты, системы автоматического регулирования и т.п.), и в которой получено много новых фундаментальных результатов, продолжает развиваться.

Границы применимости классической механики

В настоящее время известно три типа ситуаций, в которых классическая механика перестаёт отражать реальность.

- Свойства микромира не могут быть поняты в рамках классической механики. В частности, в сочетании с термодинамикой она порождает ряд противоречий. Адекватным языком для описания свойств атомов и субатомных частиц является квантовая механика. Переход от классической к квантовой механике – это не просто замена уравнений движения, а полная перестройка всей совокупности понятий (что такое физическая величина, наблюдаемое, процесс измерения и т. д.)
- При скоростях, близких к скорости света, классическая механика также перестаёт работать, и необходимо переходить к специальной теории относительности. Опять же, этот переход подразумевает полный пересмотр парадигмы, а не простое видоизменение уравнений движения. Если же, пренебрегая новым взглядом на реальность, попытаться всё же привести уравнение движения к виду $F = ma$, то придётся вводить тензор масс, компоненты которого растут с ростом скорости. Эта конструкция уже долгое время служит источником многочисленных заблуждений, поэтому пользоваться ей не рекомендуется.
- Классическая механика становится неэффективной при рассмотрении систем с очень большим числом частиц (или же большим числом степеней свободы). В этом случае практически целесообразно переходить к статистической физике.

ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Электрические и магнитные явления известны с древних времен. Это - молния, свойство янтаря после натирания шерстью притягивать легкие предметы, а магнита - железные предметы.

Наблюдались также *«Огни святого Эльма»* - особого рода электрические разряды в форме светящихся кисточек, которые иногда возникают на острых концах высоких предметов. Свое название это свечение получило в средние века по имени церкви «святого Эльма», на башнях которой они часто наблюдались.

Согласно легенде свойство натертого янтаря притягивать легкие предметы открыл древнегреческий мыслитель Фалес из Милета после того, как его юная дочь не могла очистить янтарное веретено после прядения. И термин *«электричество»* происходит от греческого слова - *«янтарь»*. Долгое время под «электричеством» понимали *«способность притяжения легких тел»*.

Многие века явления магнетизма были предметом самых невероятных рассказов и использовались магами, знахарями, шаманами в их «волшебных» деяниях. Магнит наделяли таинственной животворной силой, и свято верили в то, что с помощью намагниченной воды и манипуляций «волшебным талисманом» можно изгонять болезни и лечить израненные души. Практическое использование магнита началось с изобретения компаса. Достоверных сведений о том, когда, где и кем был изобретен компас, не существует. В некоторых книгах по истории физики сообщается, что еще в глубокой древности (около 2700 г. до н.э.) китайцы знали о свойстве магнитной иглы ориентироваться в определенном направлении. При этом считалось, что направление магнитной иглы задается какой-то звездой или особой точкой небосвода. И что в XI веке н.э. арабы переоткрыли это свойство магнитной иглы (стрелки) и создали компас.

Первый рукописный трактат по магнетизму - *«Послание о магните»* - был написан в 1269 г. Пьером де Марикуром (или *Перегрино*), но опубликован только в 1558 г. Используя магнит круглой формы, Перегрино проводил на нем линии вдоль установившихся различных положений иглы, которую он клал на магнит. Когда он таким способом получил достаточно много линий, то с удивлением обнаружил, что некоторые линии (окружности) проходят через две противоположные точки. Перегрино назвал эти точки по аналогии с Землей полюсами магнита. Он показал также, что два поднесенных друг к другу магнита притягиваются или отталкиваются в зависимости от расположения их полюсов, и установил, что распиленный пополам магнит превращается в два магнита, а железо при соприкосновении с магнитом само становится магнитом (явление магнитной индукции).

Развитие представлений об электрических и магнитных явлениях

«Отцом науки об электричестве» по праву считается английский ученый Уильям Гильберт. В трактате *«О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле; Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов»*, изданном в 1600 г. в Лондоне, Гильберт описал более 600 проведенных им опытов для исследования электрических и магнитных явлений.

Во времена Гильберта в науке господствовал схоластический метод, в котором главным аргументом была ссылка на учения признанных классиков древности и на Священное Писание. Не признавая этот метод, Гильберт считал, что в основе научного вывода должен лежать опыт. До Гильберта представления об электрических явлениях находились фактически на уровне знаний Фалеса Милетского. Гильберт создал первый электрический прибор - *«версор»*. Это стрелка на острие, прототип электроскопа.

С помощью такого прибора Гильберт показал, что притягивать легкие предметы (соломинки) способен натертый янтарь, алмаз, сапфир, карборунд, опал, горный хрусталь, стекло, сера и т.д. Эти вещества он назвал *«электрическими»*. Он обнаружил также, что в присутствии пламени электрические свойства тел, приобретенные при трении, утрачиваются.

Для изучения земного магнетизма Гильберт впервые изготовил модель земного шара (по латыни - *«террелла»*) выточенную из природного магнита. Исследования он проводил с помощью магнитного зонда, представлявшего короткую магнитную стрелочку, свободно вращающуюся на подставке с острием. С помощью такого зонда Гильберт зафиксировал магнитные полюса, магнитные меридианы, параллели и экватор. Он обнаружил, что на некотором расстоянии *«террелла»* почти не действует на зонд, и пришел к выводу, что *«террелла»* окружена *«сферой магнитной мощи»* определенной толщины. Он впервые показал, что с точки зрения магнитного действия Земля отличается от изготовленного им магнитного шара только своими размерами. Это наносило серьезный удар по церковным догматам того времени, которые основывались на мифе, что мир небесный (надлунный) устроен совсем иначе, чем мир земной (подлунный). Идеи же Гильберта означали, что космические явления можно изучать теми же методами, что и при изучении обыденных явлений. Так же считали Галилей, Кеплер и др. Все ненаучные, мистические объяснения магнитных явлений Гильберт называл *«бредом вздорной старухи»*.

Для представления о сложных путях формирования научных представлений и науки в целом следует отметить оригинальную теорию магнетизма, которую развивал Рене Декарт в своем труде *«Начала философии»* в 1644 г. Декарт был убежден, что понять какое-либо явление - значит наглядно его себе представить. При этом он часто использовал самые фантастические предположения. Например, для объяснения магнетизма он предполагал, что вокруг всякого магнита происходит циркуляция двух встречных потоков мельчайших винтообразных частиц с противоположной резьбой. Казалось, что опыты с помощью железных опилок подтверждают наличие и

расположение этих потоков в пространстве. На этом основании Декарт считал, что все магниты содержат винтообразные поры с соответствующей резьбой для каждого вида частиц. Как ни странно, но с помощью таких представлений Декарту удалось объяснить многие магнитные явления. Это еще раз показывает, что далеко *не все объяснения опытных данных и развиваемые на их основе представления являются строго научными.*

Пока электризации тел добивались лишь с помощью натирания стеклянной палочки шерстью, новые значительные результаты получить было невозможно. Ситуация изменилась после изобретения электрической машины.

Первую электрическую машину построил в 1660 г. немецкий физик-любитель бургомистр Магдебурга Отто фон Герике. Это был шар из плавленной серы, насаженный на горизонтальную железную ось. Вращая шар и натирая его ладонями, Герике тем самым электризовал его. С помощью этого прибора он изучал электрические явления. В 1706г. в Лондоне Френсис Гауксби (1666-1713) заменил шар из серы на стеклянный, что позволяло ему получать более сильную электризацию. С помощью такой машины он проводил опыты по электризации тел в разреженном воздухе и обнаружил, что вокруг наэлектризованных тел возникает свечение. Он же впервые наблюдал явление, получившее название «электрический ветер». Английский физик Стефен Грей (1666-1736) в 1729 г., исследуя *«передачу электричества»*, открыл явление электропроводности. Он показал, что электричество может передаваться от одного тела к другому по металлической проволоке или прядельной нити, но не может передаваться по шелковой нити. Грей первый разделил все тела на проводники и непроводники электричества. Анализируя результаты своих опытов, французский физик Шарль Дюфе (1698-1739) в 1733 г. пришел к выводу, что *«существуют два рода электричества, отличных друг от друга, а именно стеклянное и смоляное, из которых одно притягивает тела, отталкиваемые другим»*. Для измерения электричества он усовершенствовал версор Гильберта и создал своего рода *электрометр*. В 1735 г. Дюфе впервые высказал идею об электрической природе молнии и грома.

В XVIII в. происходило постепенное накопление опытных фактов, и стали возникать новые понятия и термины. В 1742 г. английский физик Жан Деагюлье (1683-1744) ввел термины *«проводник»* и *«изолятор»*. Развитию представлений об электрических явлениях способствовало изобретение в 1745 г. конденсатора - знаменитой *лейденской банки*. Ее изобрел голландский физик профессор Лейденского университета Питер ван Мушенбрук (1692-1761).

Демонстрация разрядки конденсатора через тело экспериментатора (лейденский опыт) была научной сенсацией XVIII в. Вначале для накопления зарядов использовался сосуд с водой, который впоследствии был заменен стеклянной банкой, обложенной металлической фольгой внутри и снаружи.

Первый плоский конденсатор создал в 1746-1754 гг. американский государственный и политический деятель и физик Бенджамин Франклин (1706-1790).

Он ввел термины «конденсатор», «батарея» конденсаторов. Конденсатор Франклина состоял из двух металлических пластин, разделенных стеклянной прослойкой. Примерно в тот же период итальянский физик Джованни Беккариа (1716-1781) впервые ввел понятие электрического сопротивления и показал, что электрический заряд в проводниках распределен по его поверхности. В 1778 г. выдающийся итальянский физик Алессандро Вольт (1745-1827) ввел термины «электрическое напряжение» и «электроемкость».

Наряду с введением новых Понятий и терминов создавались измерительные приборы, которые были необходимы для количественной оценки электрических явлений. Французский физик-экспериментатор аббат Жан Нолле (1700-1770), назвавший первый конденсатор Мушенбрука лейденской банкой, в 1747г. изобрел электроскоп и усовершенствовал электрическую машину. Нолле поражал светскую публику своими эффектными опытами по электричеству: он публично убил разрядом воробья. В 1745 г. петербургский ученый Георг Рихман (1711-1753) сконструировал первый электрический измерительный прибор - «электрический указатель». С помощью этого указателя Рихман изучал электризацию и электропроводность тел и открыл явление электростатической индукции (1748-1751). В 1752-1753 годах он исследовал атмосферное электричество с помощью построенной им «громовой машины» и впервые попытался «до некоторой степени определить градус электричества, порождаемый молнией». Стоя у «указателя», он приблизил голову к шкале для лучшего наблюдения и был насмерть поражен ударом молнии. Это потрясло русское общество и весь мир. Церковь потребовала немедленно запретить такого рода «богопротивные исследования».

Накопленные многочисленные опытные факты требовали теоретического осмысления. Первые попытки в этом направлении сделал Франклин. В 1747 г. он предложил «унитарную теорию» электричества. Он считал, что в природе существует особая единственная «электрическая субстанция» - электрический флюид, очень тонкая жидкость, пронизывающая все тела. Эта жидкость отличается от обычной материи тем, что частицы обычной материи взаимно притягиваются, а частицы «электрической субстанции» взаимно отталкиваются друг от друга. Он предполагал, что эта субстанция состоит «из чрезвычайно малых частиц, так как она способна проникать в обыкновенную материю, даже в самые плотные металлы, с большою легкостью и свободой, как бы не встречая при этом сколько-нибудь заметного сопротивления». Он считал, что тело назлектризовано либо потому, что в нем избыток электрического флюида по сравнению с нормальным состоянием, либо ее недостаток. Франклин впервые ввел понятие положительного и отрицательного электричества (заряда) и обозначения: «+» и «-», а также установил закон сохранения электрического заряда.

Против теории Франклина во Франции выступал аббат Нолле, который считал, что сущность электричества состоит в процессах «истечения электрической материи», возникающих в окружающем пространстве. Не одобряли теорию

Франклина также Рихман и Ломоносов. Оригинальные представления развивал Леонард Эйлер. Он считал, что все оптические, электрические, магнитные и другие явления объясняются взаимодействием «грубой» материи и более «тонкого» вещества, менее плотного, но более упругого. Это тонкое вещество называли эфиром. По Эйлеру электрические явления связаны с *«нарушением равновесия в эфире»*. Обе теории - Эйлера и Ломоносова - принципиально отличались от других теорий тем, что они связывали электрические явления со специфическими формами движения. Однако в практическом отношении теория Франклина оказалась более полезной, в частности, потому, что она стала основой для защиты от молнии. Вместе с тем теория Франклина, как и все теории того времени, имела существенный дефект - она носила качественный характер. Это объясняется тем, что в то время еще не было четко сформулированной системы понятий в области электрических и магнитных явлений. Эксперименты, как правило, были случайными, не целенаправленными, и носили качественный характер. Скорее это были демонстрации, а не научные опыты.

Первые попытки создать математическую теорию электрических и магнитных явлений на основе представлений Франклина об электрических и магнитных жидкостях предпринял петербургский ученый Франц Эпинус (1724-1802). В его трактате *«Опыт теории электричества и магнетизма»* (1759) обсуждается важная количественная характеристика - сила электрического притяжения и отталкивания. Эпинус поставил вопрос о функциональной зависимости этой силы от расстояния. Его правильная мысль об этой зависимости не может, конечно, рассматриваться как открытие «закона Кулона», потому что она носила чисто интуитивный характер и не была подтверждена каким-либо экспериментом.

Открытие основного закона электростатики

Одну из первых попыток измерить силу взаимодействия между заряженными телами предпринял немецкий физик К. Кратценштейн в 1746 г. Он измерял силу, действующую между стеклянным шаром электрической машины и диском, подвешенным на стальной проволоке. Несмотря на большую погрешность измерений, которая доходила до 245%, он утверждал, что сила взаимодействия уменьшалась обратно пропорционально расстоянию между диском и поверхностью шара. В то время еще не было четкого понимания различия между силами, действующими между макроскопическими заряженными телами, и силами, действующими между «элементарными», или как потом стали говорить, точечными зарядами. Это часто приводило к неправильной интерпретации экспериментальных результатов. К тому же, как отмечал Вольт, многие экспериментаторы заранее исходили из того, что *«электрическое действие обратно пропорционально квадрату расстояния»*. Правильный подход к решению этой проблемы, вероятно раньше Кулона, нашел английский естествоиспытатель Дж. Робайсон. Он исходил из того, что взаимодействующие заряженные тела можно считать точечными, если размеры заряженных

сфер много меньше расстояния между центрами сфер. После большого количества измерений он пришел к выводу, что с учетом погрешностей измерений *«действие между сферами в точности пропорционально обратному квадрату расстояния между их центрами»*. Однако описание экспериментальной установки Ро-байсона и полученные им результаты были опубликованы лишь после 1801 г., когда закон Кулона уже был признан научным сообществом.

Примерно в 1771 г. очень аккуратные измерения *«закона электрической силы»* проводил выдающийся английский ученый Генри Кавендиш (1731-1810). Он одним из первых использовал понятие емкости проводника, хотя сам он такой термин не применял. Емкость у него имела размерность длины, как и в современной электростатической системе единиц. Введение этого понятия позволило Кавендишу проводить количественные измерения электрических явлений. В частности, он первый корректно подтвердил закон «обратных квадратов» в работе *«Экспериментальное определение закона электрической силы»*. Важнейшей особенностью работы Кавендиша было проведение им дополнительных экспериментов для определения точности измерений. Однако Кавендиш не опубликовал эти результаты, как и многие другие свои экспериментальные результаты в области электричества. Труды Кавендиша с названием *«Электрические исследования достопочтенного Генри Кавендиша»* были изданы Дж. Максвеллом лишь в 1879 г.

Честь открытия основного закона электростатики принадлежит французскому физiku и военному инженеру Шарлю Кулону (1736-1806). В 1781 г. Кулон сформулировал законы трения качения и скольжения. Кулон построил прибор для измерения силы - крутильные весы, которые представляли собой шедевр экспериментального искусства того времени. Подробное описание крутильных весов и результаты своих электрических измерений Кулон опубликовал в мемуаре: *«Конструкция и применение электрических весов, основанных на свойстве металлических проволок иметь силу кручения, пропорциональную углу кручения»* (1785).

После тщательных измерений с помощью крутильных весов Кулон сформулировал *«Фундаментальный закон электричества. Сила отталкивания двух маленьких шариков, наэлектризованных электричеством одной природы, обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами шариков»*.

Как и многие его предшественники, Кулон вначале исследовал силу отталкивания. Для изучения сил притяжения ему пришлось изменить методику измерений, которую он описал в мемуаре 1785 г. Измерения также привели к закону «обратных квадратов». Надо сказать, что Кулон принимал за очевидный факт то, что сила электрического взаимодействия пропорциональна произведению *«электрических масс»*. Независимое доказательство этого было невозможно, поскольку сам закон Кулона использовался для введения единицы заряда. Построение логически безупречной системы понятий произошло позднее после накопления многих экспериментальных фактов и их теоретического осмысления и обобщения.

Опытные данные, полученные Кулоном, стали основой для создания математической теории электростатики, которую развили и довели до совершенства в XIX веке С.Д. Пуассон (1781-1840), К.Ф. Гаусс (1777-1855), Дж. Грин (1793-1841), М.В. Остроградский (1801-1862) и др.

Большинство физиков - современников Кулона сразу поверило в открытый им закон «обратных квадратов», хотя многие считали, что необходимо провести более точные эксперименты. Однако в первой половине XIX в. были сделаны новые важные открытия в области электрических и магнитных явлений, которые отодвинули проблему проверки закона Кулона на второй план. Для представления о сложностях возникающих при строгом подходе к выведению основного закона электростатики следует процитировать Максвелла. Обсуждая закон взаимодействия электрических зарядов, Максвелл в «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873) писал: *«Можно считать, что эксперименты Кулона с крутильными весами с некоторым приближением к точности установили закон силы. Эксперименты этого рода, однако, считаются трудными и до некоторой степени неопределенными из-за нескольких возмущающих воздействий, за которыми необходимо тщательно следить, чтобы вносить соответствующие поправки. Во-первых, два наэлектризованных тела должны иметь размеры, ощутимые в сравнении с расстоянием между ними, чтобы они могли нести заряды, достаточные для возникновения заметных сил. Тогда действие каждого тела влияет на распределение электричества на другом, так что нельзя будет даже считать, что заряды распределены по поверхности или сосредоточены в центре тяжести; этот эффект должен быть учтен путем сложных рассматриваний... Другая трудность происходит от действия электричества, индуцированного на стенках чехла, в котором находится прибор. Если сделать внутренность прибора в точности цилиндрической, а ее внутреннюю поверхность - из металла, то этот эффект можно считать определенным и измеримым. Независимая трудность проистекает от несовершенства изоляции тел, вследствие которой заряд непрерывно уменьшается...»*. Так Максвелл совершенно точно указал на трудности при проведении опытов Кулона. Поэтому вплоть до наших дней было выполнено несколько исследований по установлению точности действия закона. Точность оценивается как поправка к квадрату степени в формуле закона

$$F = R^{-2+q}.$$

В 1971 г. американские физики Э. Уильямс, Дж. Фоллер и Г. Хилл показали, что закон Кулона выполняется с фантастической точностью: $q \leq 6 \times 10^{-16}$.

Возникает естественный вопрос: для чего нужны подобные очень сложные и трудоемкие эксперименты? Разве и так не ясно, что закон Кулона справедлив? Однако такие эксперименты чрезвычайно важны для науки. Дело в том, что точное выполнение закона Кулона оказывается тесно связанным с принятым в физике положением, что масса фотона равна нулю: $m_\lambda = 0$. Так что опыты Э. Уильямса, Дж. Фоллера и Г. Хилла позволили оценить верхний предел массы фотона: $m_\lambda \leq 1,6 \times 10^{-47}$ г.

Эксперименты последнего времени установили новый предел массы фотона: $m_\gamma \leq 10^{-51}$ з, или $7 \cdot 10^{-19}$ эВ.

Закон Кулона отражал лишь внешнее проявление взаимодействия между электрическими зарядами - силу, при этом оставался вопрос - каким образом и почему взаимодействуют заряды? Вплоть до последней четверти XIX в. большинство физиков придерживалось концепции дальнего действия, непосредственного действия на расстоянии. Собственно, такие же представления принимались и в теории тяготения еще со времен Ньютона. Согласно концепции дальнего действия воздействие одного тела на другое распространяется мгновенно на сколь угодно большое расстояние. Одним из немногих, кто не разделял таких представлений, был выдающийся английский физик-экспериментатор Майкл Фарадей (1791 -1867). Фарадей проводил экспериментальные исследования в области электричества, магнетизма, магнитооптики, электрохимии. Им сделано множество открытий: закон электромагнитной индукции, законы электролиза, возникновение экстратоков при замыкании и размыкании цепи, вращение плоскости поляризации света в магнитном поле и др. Он ввел различные понятия, которые широко используются в физике: катод, анод, ионы, электролиз, электролиты, анион, катион, подвижность, электроды, диэлектрическая проницаемость, поле и силовые линии поля. Он является одним из создателей учения об электромагнитном поле. Фарадей экспериментально доказал закон сохранения электрического заряда. Он высказал гипотезу об электромагнитной природе света. Его экспериментальные исследования легли в основу созданной Максвеллом теории электромагнетизма.

По ньютоновским представлениям пространство является пассивнымместищем тел и электрических зарядов. Заслуга Фарадея в выдвижении идеи, что само пространство активно участвует в физических явлениях, т.е. вокруг электрически заряженных тел существует электромагнитное поле. Введение представлений об электромагнитном поле явилось важным и плодотворным открытием в физике. Об этом писал Эйнштейн: *«Надо иметь могучий дар научного предвидения, чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между частицами»*. Джеймс Максвелл в *«Трактате об электричестве и магнетизме»* отмечал: *«Фарадей своим мысленным взором видел пронизывающие все пространство силовые линии там, где математики видели центры сил, притягивающие на расстоянии. Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния. Фарадей усматривал местонахождение явлений в тех реальных процессах, которые происходят в среде, а они довольствовались тем, что нашли его в силе действия на расстоянии, которая прилагается к электрическим жидкостям»*.

После создания Максвеллом общей теории электромагнетизма, из которой следовало, что скорость распространения электромагнитных возмущений конечна, концепция дальнего действия была физиками отвергнута.

Во времена Фарадея электричество многими рассматривалось как научная абстракция, которая не может быть использована в практических целях. Однако Фарадей был убежден, что это не так. Говорят, что когда премьер-министр Великобритании спросил Фарадея о практической ценности электричества, то он ответил: «Когда-нибудь Ваше правительство введет на него налог».

Постоянный электрический ток

В 1786 г. итальянский профессор анатомии Луиджи Гальвани (1737-1798) открыл в препарированных ножках лягушек кратковременный импульс электрического тока, или как он называл, *«животного электричества»*. Свои результаты он опубликовал в 1791 г. в *«Трактате о силах электричества при мышечном движении»*. Гальвани заметил, что при соединении металлическим проводником мышц и нервов только что препарированной лягушки сразу же происходит сокращение ее мышц. Оказалось, что сокращения становятся более сильными и длительными, если проводник состоит из двух разных металлов, например, железа и меди или серебра. Гальвани считал, что сокращения мышц лягушки вызваны возникновением в них электрического тока. Он предполагал, что в каждом животном существует собственное животное электричество, и разработал теорию, по которой мышцы и нервы образуют что-то вроде обкладки лейденской банки, при этом металлический проводник является как бы разрядником, вызывающим разряд. Это были ошибочные представления, которые вскоре исправил Вольт.

К тому времени Вольт уже был известен своими работами в области электричества: в 1775 г. он изобрел смоляной электрофор, в 1781 г. - чувствительный электроскоп с соломинками, в 1783 г. - прообраз современного конденсатора, электрометр и многие другие приборы. Вольт обнаружил явление электризации при соприкосновении проводников друг с другом и металлов с электролитами. Вольт повторил опыты Гальвани и полученные результаты опубликовал в 1792 г. Он впервые обратил внимание на роль контактов в замкнутой цепи из разнородных проводников - металлов и водного раствора: *«...весь эффект состоит в указанном контакте металлов, которые в данных условиях являются не только простыми проводниками, как в других случаях, но также истинными двигателями и возбудителями электричества; и это - главное открытие»*. Вольт установил, что для тока нужны три разных проводника - два металла и один раствор или два раствора и один металл. Исследования в этом направлении привели Вольту в конце 1799 г. к созданию первого источника постоянного тока - вольтовой батареи, или вольтова столба, создающего *«непрерывное течение электрической жидкости»*. Вольтова батарея представлялась как бы лейденской банкой, которая автоматически восстанавливала свое заряженное состояние. Источник Вольты был прост по конструкции. Он состоял из 20 пар цинковых и серебряных дисков, проложенных суконными кружочками, которые были смочены соленой водой. Английские физики

Никольсон (1753-1815) и Карлейль замкнули ток через трубку, наполненную водой, и обнаружили выделение водорода около одного их электродов, погруженных в воду, тогда как другой электрод окислялся. Так в 1800 г. в Англии было обнаружено разложение воды гальваническим током. Это было первым применением постоянного тока и указанием на электрическую природу связи между частицами вещества.

Одна из наиболее мощных электрических батарей была сооружена в 1802 г. профессором Санкт-Петербургской медико-хирургической академии В.В. Петровым (1761-1834). Его батарея состояла из 2100 пар медных и цинковых кружков. Он впервые получил электрическую дугу, которую пытался применить для освещения, для плавления тугоплавких тел, для восстановления металлов из руд. Однако его результаты остались неизвестными в Западной Европе, возможно, потому, что книга с описанием его опытов была опубликована в 1803г. на русском языке. В 1810г. в Англии Хемфри Дэви (1778-1829), не зная о работах Петрова, переоткрыл электрическую дугу, которую он назвал *«вольтовой дугой»*.

Майкл Фарадей в цикле работ 1834-1840 гг. показал, что электродвижущая сила возникает в результате преобразования химической энергии в электрическую на границах металлов с раствором. Это означало, что ток в цепи батареи не может протекать вечно. Металл расходуется и его запас ограничен. Этого контактная теория не учитывала. Идеи Фарадея легли в основу нынешней теории источников постоянного тока, аккумуляторов.

Создание источников постоянного тока дало толчок к новым исследованиям электрических явлений и ключ к разгадке тайн электричества. Среди многих исследователей этих явлений был скромный школьный учитель в городе Кельне Георг Симон Ом (1787-1854). В 1826-1827 гг. Ом настойчиво искал закономерности прохождения постоянного электрического тока через проводники. Пользуясь аналогией Фурье по потоку тепла, Ом предположил, что возникновение электрического тока между двумя точками можно объяснить разницей *«электростатических сил»* в этих точках. Экспериментально открыл в 1826г. основной закон электрической цепи, связывающий между собой силу тока, напряжение и сопротивление (Закон Ома). В 1827г. вывел его теоретически (для участка и полной цепи), ввел понятия *«электродвижущей силы»*, *«падения напряжения»* и *«проводимости»*. Выполнил (1830г.) первые измерения Э.Д.С. источника тока.

Дальнейшее открытие законов постоянного тока связано с именем Кирхгофа. Он сформулировал два правила для произвольной разветвленной сети проводов, отдельные участки которых содержат гальванические элементы или другие источники тока (1845-1847). Первое правило основывается на законе сохранения электрического заряда для линейных проводников. Второе правило является следствием закона Ома.

В 1963 г. американский физик Ганн сделал важное открытие (эффект Ганна). Он обнаружил, что если на кристалл арсенида галлия (соединение галлия с мышьяком) подать достаточное большое напряжение, то в цепи возникают колебания тока со

строго определенной частотой, которая зависит от длины образца. Этот эффект используется в генераторах и усилителях СВЧ колебаний.

Измерения электрических и магнитных величин требовали введения унифицированной системы единиц. Начало метрологии в электродинамике заложил немецкий физик и математик Карл Гаусс (1777-1855), который в 1832 г. создал *абсолютную систему единиц*.

Гаусс ввел три основные единицы: единицу времени - 1 с, единицу длины - 1 мм, единицу массы - 1 мг. В дальнейшем были приняты другие единицы длины (1 см) и массы (1 г). Такую систему мер называют *гауссовой системой* единиц. В электродинамике она дополняется электрическими и магнитными единицами. Она является комбинацией двух систем единиц - абсолютной электростатической (СГСЭ) и абсолютной электромагнитной систем единиц (СГСМ). В настоящее время специальным соглашением введена Международная система единиц СИ. Такая система обладает рядом принципиальных недостатков, но она оказалась удобной на практике.

ЗАРОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

С древних времен считалось, что электрические и магнитные явления никак не связаны друг с другом. Но уже в 1749 г. Франклин заметил, что молния и электричество способны разрушить магнетизм, или даже обратить полярность магнита.

С созданием источников постоянного тока расширились возможности исследования электрических и магнитных явлений, что привело к новым открытиям. В 1820 г. датский физик Ханс Кристиан Эрстед (1777-1851) обнаружил воздействие на магнитную стрелку электрического тока, текущего по проволоке, замыкающей вольтовую батарею.

Отклонение магнитной стрелки вблизи проводника с током было случайно замечено на лекции Эрстеда, во время которой он демонстрировал студентам Копенгагенского университета тепловое действие тока. Эрстед стал тщательно исследовать это явление. Станным в то время казалось то, что сила, действующая на магнитный полюс стрелки компаса, была направлена не по радиус-вектору, соединяющему магнитный полюс с проводом, а перпендикулярно проводу. Такого рода силы в механике Ньютона до того времени были неизвестны.

Во времена Эрстеда считалось, что существуют два вида электричества - статическое и подвижное, вызываемое вольтовой батареей. Подвижное электричество называли «*электрическим конфликтом*». Эрстед показал, что магнетизм связан только с «*электрическим конфликтом*». Об этом он сообщил в своей статье «*Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку*», опубликованной летом 1820 г.

Открытие Эрстедом взаимосвязи электрических и магнитных явлений привело к созданию нового раздела в физике - электромагнетизма. Открытие Эрстеда потрясло научную общественность и вызвало глубокий интерес к исследованиям взаимосвязи электрических и магнитных явлений.

Французский физик Андре Мари Ампер считал, что суть открытия Эрстеда состоит непосредственно в течении электричества. Он впервые предложил более точный термин «*электрический ток*». Фарадей в 1831 г. экспериментально доказал, что «*все виды электричества идентичны по своей природе*».

Ампер ввел понятие «*сила тока*», как количество электричества, перенесенное через поперечное сечение проводника в единицу времени. При этом за направление тока было принято направление движения положительного заряда. В системе СИ единица силы тока носит название «*ампер*». В 1822г. открыл эффект катушки с током (соленоид). Ампер пришел к выводу, что *все магнитные явления сводятся к чисто электрическим эффектам*. Этим были заложены основы электродинамики - теории электромагнитных явлений по образу и подобию механики Ньютона. Заметим, что в

буквальном смысле термин «электродинамика» означает учение о движении и взаимодействии электрических зарядов. Однако в современном понимании электродинамика (классическая) представляет собой учение об электромагнитном поле и его связи с электрическими зарядами и токами. В 1826г. вышел основной труд А. М. Ампера – «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта». Теория Ампера была создана по образу и духу «Начал ...» Ньютона, что дало основание Максвеллу назвать Ампера «Ньютоном электричества».

Французские физики Жан Батист Био (1774-1862) и Феликс Савар (1791-1841) проводили измерения магнитной индукции прямых проводников с током. Величина магнитной индукции рассматривалась как аналог электрической напряженности. Био и Савар установили формулу расчета магнитной индукции, возбуждаемой участком провода, по которому протекает ток определенной силы, на определенном расстоянии от провода. В этой формуле фигурировала постоянная величина *c*, называемая *электродинамической постоянной*. Эту постоянную впервые измерили немецкие физики Вильгельм Вебер и Рудольф Кольрауш (1809-1858) в 1856 г. Они получили поразительный для того времени результат: в пределах погрешностей эксперимента электродинамическая постоянная оказалась равной скорости света в вакууме. Этот факт стал понятным после открытия Максвеллом электромагнитной природы света.

Анализ закона Ампера о взаимодействии токов привел выдающегося голландского физика Хендрика Антона Лоренца (1853-1928) к выражению для силы, действующей на движущуюся в магнитном поле заряженную частицу, - силы Лоренца.

В физике XIX в. одной из основных была идея «единства физических сил». Эту идею особенно настойчиво реализовывал Фарадей. Он задавался вопросами - какова связь между электричеством и магнетизмом? Можно ли превратить одно в другое? Проведя многочисленные эксперименты, он пришел к открытию в 1831 г. *закона электромагнитной индукции*. Этот закон стал важным шагом на пути создания электродинамики. Вот как описал Фарадей в статье «*Об индукции электрических токов*» эксперимент, который привел его к великому открытию: «*На широкую деревянную катушку была намотана медная проволока длиной 203 футов, а между ее витками была намотана проволока такой же длины, изолированная от первой хлопчатобумажной нитью. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая — с сильной батареей... При замыкании цепи наблюдалось внезапное, но чрезвычайно слабое действие на гальванометре, и то же самое действие замечалось при прекращении тока. При непрерывном же прохождении тока через одну из спиралей не удавалось обнаружить отклонений гальванометра...*». Фактически это был прообраз трансформатора. В том же году Фарадей обнаружил возникновение электрического тока с помощью только лишь магнита: «*Один конец цилиндрического магнитного стержня ... подводится к самому краю цилиндрической спирали из проволоки, после чего стержень быстро вталкивается внутрь спирали на всю длину — стрелка гальванометра при этом приходит в движение; стержень резко вытаскивается - стрелка вновь приходит в движение, но в противоположную*

сторону. Этот эффект наблюдается всякий раз, когда магнит вдвигается или выдвигается, и, следовательно, при этом возникает электрическая волна».

Проводя фундаментальные опыты, Фарадей создал первый электрогенератор - колесо Фарадея. Он писал: *«Заставил медный диск вращаться между полюсами большого подковообразного магнита Королевского общества. Ось и точка на краю диска были соединены гальванометром. При вращении диска стрелка гальванометра приходила в движение».*

После многочисленных экспериментов Фарадей дал количественную формулировку открытого им закона электромагнитной индукции.

В 1821 впервые осуществил вращение магнита вокруг проводника с током и проводника с током вокруг магнита, создав тем самым лабораторную модель электродвигателя.

Под датой 17 октября (1831) лабораторный журнал рассказывает об одном из этих опытов. *«Я взял цилиндрический магнитный брусок (3/4 дюйма в диаметре и 8,5 дюйма длиной) и ввел один его конец в просвет спирали из медной проволоки (220 футов длиной), соединенной с гальванометром. Потом я быстрым движением втолкнул магнит внутрь спирали на всю его длину, и стрелка гальванометра испытала толчок. Затем я также быстро вытащил магнит из спирали, и стрелка опять качнулась, но в противоположную сторону. Эти качания стрелки повторялись всякий раз, как магнит вталкивался или выталкивался. Это значит, что электрическая волна возникает только при движении магнита, а не в силу свойств, присущих ему в покое».*

В этих исторических опытах Фарадей впервые упоминает свои знаменитые «линии магнитных сил» и поясняет: *«Линиями магнитных сил я называю те линии, которые становятся доступными нашему зрению, когда мы рассматриваем расположение железных опилок вокруг полюсов магнита».*

В 1833 – открыл законы электролиза, которые стали весомым аргументом в пользу дискретного характера электричества. Ввел понятия: подвижность (1827); катод, анод, ионы, электролиз, электролиты, электроды (1834).

В 1837 обнаружил влияние диэлектриков на электрическое взаимодействие и ввел понятие диэлектрической проницаемости.

В 1845 открыл диамагнетизм, а в 1847 – парамагнетизм. В 1845 обнаружил явление вращения плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея) и в этом же году употребил термин *«магнитное поле».*

По мнению А. Эйнштейна, идея поля была самой оригинальной идеей Фарадея, самым важным открытием со времен Ньютона. У Ньютона и других ученых пространство выступало как пассивноеместилище тел и электрических зарядов, у Фарадея же пространство участвует в явлениях. *«Надо иметь могучий дар научного предвидения, - писал А. Эйнштейн, - чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между зарядами и частицами».*

Ради исторической справедливости следует отметить, что явление электромагнитной индукции наблюдал в том же 1831 г. американский физик Джозеф Генри (1797-1878). Однако Фарадей несколько раньше опубликовал свои результаты. Генри первый сконструировал мощные подковообразные электромагниты, способные поднимать грузы в одну тонну (1828), построил электрический двигатель (1831), обнаружил явление самоиндукции и экстратоки (1832). Он изобрел электромагнитное реле.

Открытие уравнений Максвелла

Описание огромного количества электромагнитных явлений и их полное понимание стало возможным после открытия фундаментальных уравнений физики, которые носят имя Джеймса Кларка Максвелла.

Уравнения Максвелла относятся к фундаментальным уравнениям физики, и как все уравнения такого рода, они основаны на обобщении многих экспериментальных фактов. До Максвелла Лаплас, Пуассон, Ампер, Гаусса, Вебер, Нейман и их последователи создали теорию электромагнитных явлений на основе представлений механического типа о дальнодействии. Эта теория хорошо описывала многие экспериментальные факты. Вместе с тем, ряд фактов оставался непонятным в рамках таких представлений. Многие другие факты упрямо не вписывались в рамки существовавшей теории. Лишь Фарадей, не знавший высокой математики и могущий лишь любоваться математическими символами в теории, противопоставил красивым теориям трезвый подход реалиста.

Максвелл был очарован наглядными представлениями Фарадея о силовых линиях, пронизывающих и заполняющих пространство между зарядами и токами. Он писал: *«Не следует смотреть на эти линии как на чисто математические абстракции. Это - направления, в которых среда испытывает натяжение, подобное натяжению веревки или, лучше сказать, подобное натяжению собственных наших мускулов»*. Развивая эти представления, Максвелл широко пользовался механическими аналогиями. Сложные электромагнитные явления он моделировал вращением и движением «шестеренок». Такая модель помогла Максвеллу прийти к открытию тока смещения (в статье *«О физических силовых линиях»*, 1861-1862). Он считал, что электромагнитные явления имеют механическую природу, и развиваются они в некоей упругой среде - эфире.

Максвелл считал, что напряженность электрического поля связана с упругими напряжениями в эфире, а магнитная индукция - с его вихревыми движениями. Он представлял себе электромагнитное поле как *«состояние движения или напряжения в среде, уже существующей в пространстве»*.

Что касается энергии, то *«Всякая энергия есть то же, что механическая энергия, существует ли она в форме обычного движения или в форме упругости, или в какой-нибудь другой форме... Энергия в электромагнитных явлениях - это механи-*

ческая энергия». В этом Максвелл опирался на закон сохранения и превращения энергии, согласно которому любой вид энергии эквивалентен механической энергии.

В 1864 г. Максвелл впервые представил результаты своих исследований в докладе *«Динамическая теория электромагнитного поля»* Лондонскому Королевскому обществу. Отмечая важность и полезность механических аналогий, Максвелл вместе с тем подчеркивал: *«...Все подобные выражения в, настоящей статье должны рассматриваться как иллюстрирующие, а не как объясняющие»*. Такие пояснения Максвелла означают, что для него механические аналогии были важным вспомогательным средством для получения правильных соотношений при описании сложных электромагнитных процессов. Он писал: *«Теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные поля. Она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления»*. В своей *«Динамической теории электромагнитного поля»* Максвелл выдвинул гипотезу об электромагнитной природе света. К такому выводу он пришел после тщательного анализа результатов опытов по измерению скорости света и электродинамической постоянной. На близость этих значений тогда никто не обратил внимания, возможно, считали, что это случайное совпадение. Максвелл первый внимательно проанализировал этот и другие факты. Он учел также результаты опытов Физо (1819-1896) 1849 г. и Фуко (1819-1868) 1862 г. по измерению скорости света и пришел к выводу: *«Совпадение результатов, по-видимому, показывает, что свет и магнетизм являются проявлением свойств одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через посредство поля в соответствии с законами электромагнетизма»*.

Венцом многолетнего труда Максвелла стал его *«Трактат об электричестве и магнетизме»*, изданный в 1873г.

В начале *«Трактата»* он писал: *«При рассмотрении явления с математической точки зрения наиболее важным является понятие измеряемой величины»*. Для него физическая величина - это такая величина, которая может быть измерена, т.е. прямо или косвенно сверена с эталоном.

Этот тезис он подчеркивал еще в 1860 г. на лекции в Лондонском Королевском Колледже: *«Истины, которым мы подчиняемся, лежат высоко за областью туманов и бурь, скрывающей эти истины от непросвещенного ума. Тем не менее, они покоятся на крепком фундаменте мироздания и были утверждены давно в согласии с числом, мерой и весом. Все величины должны быть точными величинами, все законы должны быть выражены в терминах точных величин, чтобы всегда существовал эффективный способ обнаружения ошибки и полная гарантия против неясности или неоднозначности»*. К измерениям Максвелл относился с большим уважением,

поддерживая как бы культ измерений в физике. И сам он, имея блестящее математическое образование, проводил многие эксперименты.

Одна из глав называется *«Основные уравнения электромагнитного поля»*, в которой приведены 12 уравнений. Система уравнений Максвелла является основой современной физики, и до сих пор нет ни одного опытного факта, который бы противоречил этим уравнениям. Первое уравнение означает, что электрическое поле образуется зарядами, и силовые линии этого поля начинаются и кончаются на зарядах. Второе уравнение выражает факт отсутствия свободных магнитных зарядов, аналогичных электрическим зарядам. Магнитные силовые линии либо замкнуты, либо уходят на бесконечность. Третье (векторное) уравнение отражает закон электромагнитной индукции Фарадея. Любое изменение индукции магнитного поля приводит к возникновению вихревого электрического поля. Последнее (векторное) уравнение говорит о том, что источниками магнитного поля являются токи и изменяющееся со временем электрическое поле. Гениальной догадкой Максвелла было введение им тока смещения. Так он назвал последний член в этом уравнении. Он считал, что под действием электрического поля диэлектрик должен поляризоваться. Происходящее при этом движение зарядов и представляет собой ток смещения. Максвелл рассматривал вакуум как своеобразный диэлектрик. Поэтому понятие тока смещения он распространил и на вакуум. Именно введение тока смещения приводит к возможности существования электромагнитных волн. Одним из важных следствий теории Максвелла, помимо электромагнитной природы света, было предсказание им давления света.

Теория Максвелла не сразу была понята даже в созданной им Кавендишской лаборатории, где он был первым директором. Французские физики, воспитанные на великолепных трудах Лапласа и Ампера, также не признавали теории Максвелла, считая ее сложной и надуманной. Постепенно теория Максвелла завоевывала признание. Решающую роль в этом сыграли эксперименты Генриха Герца. В 1885-1889 гг. Герц в политехническом институте в Карлсруэ проводил знаменитые опыты и открыл электромагнитные волны. Он измерил длину их волны и скорость и показал, что они отражаются и преломляются аналогично свету. Тем самым была подтверждена идея Максвелла об электромагнитной природе света. Герц показал также, что открытые им электромагнитные волны подчиняются уравнениям Максвелла.

После открытия Герца возникли идеи об установлении беспроволочной связи с помощью электромагнитных волн, завершившаяся созданием радио (А.С. Попов, 1896).

Что же касается предсказания Максвелла о световом давлении, то лорд Кельвин долго считал, что *«вся эта часть неверна»*. И блестящие опыты русского физика Петра Николаевича Лебедева (1866-1912), доказавшего в 1899 г. существование давления света, заставили лорда Кельвина - рьяного противника максвелловской теории признать ее справедливость. Этот факт лорд Кельвин отразил в своих

воспоминаниях: *«Я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот... Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами».*

ОТКРЫТИЕ «АТОМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА»

Открытие электрона

Физическая природа того, что перемещается при протекании электрического тока, оставалась непонятной. Прояснению этого вопроса способствовали законы электролиза Фарадея (1833).

Термин «ион» («странник») Фарадей ввел для обозначения «заряженных» атомов, которые возникают в результате диссоциации (распада) молекул в растворе. Фарадей показал, что если через растворы различных веществ, молекулы которых состоят из одновалентных ионов, пропускать одно и то же количество электрического заряда, которое называют числом Фарадея, то на электродах всегда выделяется количество вещества, равное одному грамм-атому ионов этого вещества. Опыты показали, что число Фарадея равно $F = 96485 \text{ Кл/моль} = 2,895 \times 10^{14} \text{ СГСЭ/моль}$. Если пропускать ток через растворы с двухвалентными ионами, то их один грамм-атом несет с собой удвоенный заряд Фарадея, один грамм-атом трехвалентных ионов - утроенный и т.д. Но по закону Авогадро один грамм-атом любого вещества содержит одно и то же количество частиц, равное числу Авогадро N_A . Естественно считать, что весь заряд, переносимый одним грамм-атомом, равномерно распределен между всеми этими частицами. Поэтому заряд, переносимый одновалентным ионом, имеет вполне определенную величину:

$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Заряд, переносимый двухвалентным ионом, будет равен $2e$ и т.д. Таким образом, оказалось, что ионы могут нести на себе заряды $e, 2e, 3e, \dots$, и никогда не встречаются ионы с дробной частью заряда e . К выводу о дискретности электрического заряда пришел, кроме одного ученого, также Герман Гельмгольц. В своей Фарадеевской лекции в 1881 г. он говорил: *«Если мы признаем существование атомов химических элементов, то мы не можем избежать и дальнейшего заключения, что электричество, как положительное, так и отрицательное, разделено на определенные элементарные количества, которые ведут себя, как атомы электричества».*

Наименьшую величину электрического заряда по предложению Стони в 1891 г. стали называть «*электроном*». Вначале со словом «*электрон*» не связывали понятия о частице. Это было лишь обозначение элементарного электрического заряда, который переносит с собой одновалентный ион. Существование электрона как частицы, обладающей определенной массой и элементарным электрическим зарядом, было доказано совсем в других опытах.

Опыты такого рода, связанные с исследованиями *электрических разрядов* в газах, впервые начал проводить Гауссби еще в 1706 г. Изучением электрических

разрядов в газах также занимался немецкий физик Плюккер (1801-1868). Исследования Плюккера в 1859 г. показали, что темное пространство разрядной трубки пронизывают какие-то невидимые для глаза «лучи». В 1876 г. немецкий физик Эуген Гольдштейн (1850-1930) назвал их *катодными лучами*. Он показал, что эти лучи распространяются прямолинейно и испускаются перпендикулярно поверхности катода. Многие тайны катодных лучей были раскрыты в серии блестящих опытов английского физика Крукса (1832-1919) с помощью так называемых «*круксовых трубок*». Этим трубкам с большим разрежением он придавал самые разнообразные формы. Если на пути катодных лучей поставить металлический экран (Крукс использовал мальтийский крест), то за ним на противоположной стороне трубки наблюдалась его тень. Это означало, что внутри трубки катодные лучи распространяются прямо-линейно. Введя в трубку радиометр, изобретенный им в 1875 г., Крукс обнаружил вращение радиометра, когда тот оказывался на пути катодных лучей, т.е. катодные лучи оказывают механическое воздействие. При поднесении магнита пучок лучей и образуемая им тень смещаются в сторону. Это значит, что катодные лучи несут электрический заряд. Крукс считал, что катодные лучи представляют собой «*лучистую материю*» (этот термин предложил Фарадей в 1816 г.), четвертое состояние вещества, или «*ультрагазообразное состояние, столь же далекое от газообразного, насколько то далеко от жидкого*». Крукс писал: «*Изучая четвертое, лучистое состояние материи, мы, как мне кажется, имеем под руками и в сфере наших исследований те первичные атомы материи, из которых, как вполне основательно предполагают, состоят все тела природы*». Теперь четвертое состояние вещества в природе называют *плазмой*.

В 1895 г. опыты французского физика Жана Перрена (1870-1942) показали, что катодные лучи несут с собой отрицательный электрический заряд. После этого стало ясно, что материальная природа катодных лучей более вероятна, чем волновая. Но это еще не было открытием электрона.

Существование электрона как частицы и носителя элементарного электрического заряда наиболее точно и убедительно было доказано в опытах английского физика Дж.Дж. Томсона (1856-1940). Проведя ряд экспериментов с катодными лучами, Томсон пришел к выводу: «*Я не могу избавиться от заключения, что катодные лучи являются зарядами отрицательного электричества, которые переносятся частицами материи*», и продолжал: «*Что это за частицы? Атомы это или молекулы, или материя в состоянии еще более тонкого дробления?*». И он стал проводить более тонкие эксперименты. 30 апреля 1897 г. Дж. Дж. Томсон доложил о своих исследованиях и объявил, что катодные лучи состоят из отрицательно заряженных частиц, которые он назвал *корпускулами*. В дальнейшем эти частицы получили название – *электроны*. 30 апреля 1897 года считается днем рождения электрона. Так была открыта первая «элементарная» частица с массой $m_e = 9,11 \times 10^{-28}$ г и с наименьшей величиной электрического заряда. Эксперименты показали также, что отношение e/m для катодных лучей не зависит ни от сорта остаточного газа,

заполняющего разрядную трубку, ни от материала катода. Это приводило к вполне естественному выводу, что катодные лучи в разных экспериментах состоят из одних и тех же частиц. Следует сказать, что вначале лишь немногие верили в существование этих тел, меньших, чем атомы.

Таким образом, Томсон был первым, кто заявил, что «корпускулы» являются составной частью атома. В то время это был смелый шаг, поскольку Томсон стал говорить о структуре атомов, существование которых еще не было экспериментально доказано. Томсон со своими сотрудниками Таунсендом (1868-1957) и Вильсоном проводил также первые эксперименты по определению абсолютной величины заряда электрона.

Наиболее точные измерения заряда электрона проводил американский физик Роберт Милликен, начиная с 1906 г. Так непосредственно было доказано, что заряд складывается из дискретных единиц, и что в природе существует элементарный электрический заряд и его материальный носитель - *электрон*. В связи с открытием электрона интересен исторический факт – несколько раньше Томсона немецкий физик Кауфман (1871-1947), также проводивший эксперименты с катодными лучами, получил результаты, такие же, как и Томсон. Однако Кауфман не сделал вывод об открытии электрона, поскольку он стоял на позициях философского течения, основанного Махом, и называемого *позитивизмом*. Позитивизм позволял объяснять явления лишь на основе чувственного опыта. Поэтому Кауфман не мог признать существование субмикроскопической частицы, которая была недоступна непосредственному наблюдению. Так благодаря своим философским воззрениям Кауфман не стал открывателем электрона.

Развитие электродинамики

Важным шагом в развитии электродинамики Максвелла явилась теорема о переносе энергии электромагнитным полем. Ее доказали независимо в 1884 г. английские физики Джон Пойнтинг (1852-1914) и Оливер Хевисайд. Согласно этой теореме вектор плотности потока энергии электромагнитного поля определяется выражением

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \vec{H}].$$

Надо отметить, что еще в 1874 г. русский физик Николай Алексеевич Умов (1846-1915) нашел общее выражение для вектора плотности потока энергии, не применяя его специально к электромагнитному полю. Так что вполне справедливо называть этот вектор вектором Умова-Пойнтинга. Огромное разнообразие электромагнитных явлений является предметом «микроскопической» электродинамики и электродинамики сплошных сред. Микроскопическая электродинамика (классическая теория поля) - это электродинамика вакуума и точечных зарядов. В ней широко используются методы механики: вариационные

принципы, метод **Лагранжа**, метод Гамильтона. В макроскопической электродинамике вводятся феноменологические коэффициенты (диэлектрическая и магнитная проницаемости ϵ и μ коэффициент электропроводности σ), которые должны определяться из опытных данных. Однако после открытия электрона стало ясно, что электроны и компенсирующие их положительные заряды как-то определяют структуру вещества, являющегося в целом электрически нейтральным. Поэтому феноменологические коэффициенты, описывающие электромагнитные свойства среды, должны каким-то образом быть связанными с ее структурой. Впервые вопрос о вычислении феноменологических коэффициентов на основе модельных представлений о строении вещества поставил Лоренц. Созданная им классическая электронная теория вещества, построенная на основе пяти предположений, объясняла целый ряд электрических и магнитных явлений, в частности, явления дисперсии и поглощения электромагнитных волн.

Предположения:

1. Вещество состоит из положительных и отрицательных электронов². Электроны находятся в эфире, состояние которого определяется электромагнитным полем. Это поле описывается уравнениями Максвелла в вакууме - уравнениями Максвелла-Лоренца.

3. Заряд электрона распределен в очень малом объеме с некоторой плотностью ρ .

4. Движение электронов происходит под действием силы со стороны электромагнитного поля. Объемная плотность этой силы (силы Лоренца) определяется формулой: $\vec{F} = \rho(\vec{E} + [\vec{y}\vec{B}]/c)$.

5. Макроскопическое электромагнитное поле представляет собой усредненное по времени и пространству микроскопическое поле.

В электродинамике сплошных сред для замыкания системы уравнений Максвелла необходимы так называемые *материальные уравнения*. Это соотношения, связывающие вектор индукции (или вектор плотности тока) с вектором напряженности электрического поля. Для этого были введены специальные преобразования, так называемые тензоры – *тензор комплексной диэлектрической проницаемости*, описывающий эффекты *пространственно-временной дисперсии* и другие. Конкретный вид тензоров зависит от электромагнитных свойств материальных сред, описание которых осуществляется в рамках выбранной модели. С помощью таких тензоров, являющихся составной частью *дисперсионного уравнения*, рассматриваются собственные волны (моды, ветви) в различных средах, в частности, в плазме, а также начальная стадия развития неустойчивостей. В нелинейной электродинамике вводят *нелинейные* (многоиндексные) *тензоры диэлектрической проницаемости*.

Современная макроскопическая электродинамика получила обоснование фактически с использованием общих идей Лоренца, но базовые представления, конечно, иные, чем у Лоренца. Это, прежде всего, отказ от понятия эфира и уточнение

описания микрочастиц, составляющих среду. При этом описание микроскопического электромагнитного поля основывается на уравнениях Максвелла-Лоренца.

В конце XIX в. - начале XX в. остро встал вопрос об описании электромагнитных процессов *в движущихся средах*. Возникшие при этом существенные трудности и противоречия привели к созданию Эйнштейном теории относительности (1905). При этом потребовалось также изменить материальные уравнения. Подробнее об истории создании теории относительности говорится в главе «История оптики».

С созданием теории относительности потребовался пересмотр основных уравнений физики. Оказалось, что уравнения Максвелла как в вакууме, так и в материальных средах непосредственно можно записать в явно ковариантной форме. Для этого необходимо ввести 4-вектор плотности тока и тензор электромагнитного поля, компоненты которого определяют компоненты векторов напряженностей поля. Наряду с этим важным является введение 4-вектора-потенциала электромагнитного поля, который описывается волновым уравнением при определенных условиях калибровки.

Из электродинамики Максвелла выросли в самостоятельные области физики и прикладной физики такие разделы как квантовая электродинамика и квантовая теория поля, физическая электроника, плазменная электроника, электродинамика плазмы, магнитная гидродинамика, радиофизика, статистическая радиофизика, радиотехника, электротехника и т.п. С появлением мощных источников электромагнитного излучения – лазеров различных диапазонов начала развиваться *нелинейная теория* электромагнитных явлений и теория взаимодействия мощного электромагнитного излучения с веществом. Большая часть электродинамики связана с оптическими явлениями и процессами. История оптики рассматривается в следующей главе.

Монополь Дирака

Древние мыслители полагали, что все в Природе устроено по принципу красоты. Одним из неперенных условий этого принципа является наличие симметрии. Если посмотреть на уравнения Максвелла

$$\text{div}\vec{E} = 4\pi\rho, \text{div}\vec{B} = 0,$$

то сразу бросается в глаза их явная асимметрия. Электрическое поле имеет источники - электрические заряды, а у магнитного поля подобных источников нет. Более того, из оставшихся уравнений Максвелла как будто вытекает, что электричество вполне может обойтись без магнетизма, а магнетизм без электричества - никак нет. Фактически уравнения Максвелла полностью сводят магнетизм к электричеству. Это собственно провозглашал еще Ампер. Получается, что у электрического поля

источники - заряды, а у магнитного поля источники - лишь электричество - токи, связанные с движущимися зарядами.

Одним из первых, кто решил «исправить» эту несправедливость Природы, был Хевисайд. В 1891 г. он впервые записал обобщенные уравнения Максвелла в полностью симметричном виде. Однако его работу не заметили, или старались не замечать. В 1931 г. проблемой существования магнитного заряда заинтересовался выдающийся английский физик-теоретик, один из основателей квантовой теории Поль Дирак. Он пришел к выводу, что квантовая Теория не содержит в себе никаких преимуществ электричества перед магнетизмом. Магнитный заряд, аналогичный электрическому заряду, Дирак назвал *магнитным монополю*. Дирак настойчиво пытался объяснить известный экспериментальный факт: электрические заряды частиц всегда кратны элементарному заряду - заряду электрона. Нет ни одного явления, в котором проявлялась бы дробная часть заряда электрона. В статье 1931 г. «*Квантовые сингулярности в электромагнитном поле*» Дирак показал, что можно ввести магнитный монополю в полном согласии с уравнениями Максвелла при условии, что магнитный заряд μ и электрический заряд e связаны соотношением:

$$\mu e = n\hbar c/2 \text{ (условие квантования Дирака).}$$

Здесь n - целое число, c - скорость света в вакууме, \hbar - постоянная Планка.

Это соотношение объясняет факт квантования электрического заряда частиц. В конце своей статьи Дирак писал: «С этой точки зрения было бы удивительно, если бы Природа не использовала такой возможности».

Если монополи существуют, то они должны обладать удивительными свойствами. Прежде всего, как и в случае электрического заряда, должен выполняться закон сохранения магнитного заряда. При этом элементарный магнитный заряд должен быть в $137/2$ раза больше заряда электрона. Поэтому сила взаимодействия между монополями в 4692 раза больше, чем сила взаимодействия между электронами на том же расстоянии. На этом основании Дирак пришел к выводу: «Такая большая сила притяжения, возможно, объясняет, почему полюсы противоположного знака никогда не были разделены». При существовании монополей должна наблюдаться полная симметрия электрических и магнитных явлений: как магнитное поле возникает при движении электрических зарядов, так и движение магнитных монополей должно приводить к электрическим явлениям.

Идею о магнитном монополе Дирак высказал вместе с идеей о существовании «положительного электрона» - позитрона. Обе идеи в то время казались совершенно фантастическими и не вызывали доверия у физиков. Когда же в 1932 г. был открыт предсказанный Дираком позитрон, то резко возросло и доверие к другой идее Дирака, к монополю. Исследователи активно бросились искать новые частицы. Естественно было предположить, что монополи образуются примерно так же, как пара электрон-позитрон в результате столкновений между другими частицами. В лабораторных

условиях для этого использовали мощные ускорители, в которых ускоряемые до колоссальных энергий частицы сталкивались с различными мишенями. В продуктах взаимодействия таких частиц с мишенями и пытаются с помощью мощных магнитов выделить монополи. Однако многочисленные попытки, несмотря на все арсеналы средств современной физики, пока не дали никаких результатов. Предпринимались также безуспешные попытки обнаружить монополи в космических лучах, в метеоритах, в различных земных породах, в образцах лунного грунта.

В работах последнего времени (70-80 гг XX века) было показано, что если монополь существует, то он должен обладать огромной массой, сопоставимой с массой белковой молекулы или даже бактериальной клетки. Для порождения таких частиц колоссальной массы требуется огромный запас энергии, которого недостаточно не только в самых мощных современных ускорителях, но даже в космических лучах. Однако предполагается, что на ранних стадиях развития Вселенной монополи могли образоваться и сохраниться до наших дней. Поэтому все же имеется надежда обнаружить монополи.

Возникает естественный вопрос: зачем нужны трудные и многозатратные поиски экзотического монополя? В теоретическом отношении это можно объяснить тем, что уравнения Максвелла лежат в основе современной физики. Поэтому любые изменения в них повлекут за собой изменение наших представлений о мире. В практическом же отношении, как ясно из предыдущего, открытие монополей привело бы к решению энергетических проблем. Кроме того, из-за большого заряда монополя его ускорение в магнитном поле было бы намного эффективнее, чем ускорение электрически заряженных частиц. Возможно, что существуют другие явления, связанные с монополями, о которых мы пока даже не догадываемся.

ИСТОРИЯ ОПТИКИ

Слово «оптика» в переводе с греческого означает «наука о зрительных восприятиях». Оптикой называют раздел физики, который изучает свойства и физическую природу света, процессы его распространения и его взаимодействие с веществом. При этом под *светом* понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему широкие области спектра электромагнитного излучения - от рентгеновских лучей до радиоизлучения микроволнового диапазона. По современным представлениям оптика является составной частью электродинамики, однако долгое время оптические явления рассматривались совершенно отдельно от электрических и магнитных явлений и считались независимыми от них. Согласно традиции оптику разделяют на *геометрическую, физическую и физиологическую*.

Еще в древнем мире мыслители изучали закономерности зрения и поведения световых лучей. Великий мыслитель древности Платон создал первую теорию зрения. О явлении преломления света было известно Аристотелю. Начало геометрической оптике положил древнегреческий ученый Евклид, который, как и Платон, развивал теорию зрительных лучей - прямых линий. В этой теории предполагалось, что «лучи зрения» испускаются из глаз. Естественный вопрос о том, почему тогда человек не видит в темноте, Платон разъяснял так: зрение возникает лишь при соединении двух видов огня: *«огонь, устремляющийся изнутри, сталкивается с внешним потоком света,... внутренний и внешний огонь вступают в общение и сливаются воедино...»*.

Евклид сформулировал закон прямолинейного распространения света и закон отражения от плоских и сферических зеркал. Закон прямолинейного распространения непосредственно доказывается наблюдениями над резкими тенями, даваемыми малыми источниками света. Соотношение между контуром освещаемого предмета и его тенью соответствует геометрическому проектированию с помощью прямых линий. Вероятно, само понятие о прямой линии возникло из оптических наблюдений. Геометрическое понятие прямой как линии кратчайшего расстояния между двумя точками, представляет собой понятие о линии, по которой распространяется свет в однородной среде. Этим с незапамятных времен пользовались на практике для контроля прямолинейности лекала или изделия по лучу зрения.

Наблюдались также явления преломления света (*диоптрика*). В I - II вв. н.э. Клавдий Птолемей экспериментально исследовал явление преломления света и впервые ввел поправку на атмосферную рефракцию. Он проводил измерения относительно небольших углов и пришел к неправильному выводу, что угол преломления пропорционален углу падения.

Первые исследования по физиологической оптике проводил арабский физик средневековья Абу Али Хайсам (*Альхазен*). Опираясь на данные древнеримского врача

Галена (около 131-211), Альхазен описал строение глаза. С помощью опытов он доказал, что представления о свете Платона и Евклида являются ошибочными. Альхазен развил свою теорию света, по которой *«естественный свет и цветные лучи влияют на глаз»* и *«зрительный образ получается при помощи лучей, которые испускаются видимыми телами и попадают в глаз»*. Он считал, что каждой точке наблюдаемого предмета соответствует некоторая воспринимающая точка глаза, и дал правильное объяснение видения двумя глазами. Исследуя отражение и преломление света, он впервые установил, что нормаль к поверхности зеркала, падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости. Альхазен обнаружил, что отношение углов падения и преломления не остается постоянным, но установить правильный закон преломления ему не удалось. Он высказал предположение, что свет распространяется с конечной скоростью.

В XIII в. английский философ Роджер Бэкон измерил фокусное расстояние сферического зеркала и открыл сферическую абберацию. Он высказал идею зрительной трубы, один из первых рассматривал линзы в качестве научных приборов. В XIII в. появились очки. В конце XVI в. голландские мастера изобрели зрительную трубу и микроскоп, построение которых связывают с именем Захария Янсена. Несколько позднее (1610-1614) микроскопы конструировал Галилей. Создание оптических приборов играло важную роль в развитии оптики как науки. Сконструировав в 1609 г. зрительную трубу (трубу с вогнутым окуляром), Галилей использовал ее как телескоп для астрономических наблюдений, и сразу же *«...вещи казались через него почти в тысячу раз крупнее и более чем в 30 раз приближенными, чем при рассмотрении естественным путем»*.

Очень важным было открытие закона преломления света. Этот закон нашел опытным путем (около 1621 г.) голландский ученый Снеллиус. В своем сочинении, которое осталось неопубликованным, он указал, что отношение косекансов углов падения и преломления остается постоянным. В 1637 г. Рене Декарт в труде *«Диоптрика»* теоретически доказал этот закон и дал ему формулировку, которая принята в современной оптике. Для объяснения законов распространения света Декарт ввел особую среду - эфир, наделенную механическими свойствами. В 1665 г. уже после смерти профессора коллегии ордена иезуитов в Болонье Франческо Гримальди был опубликован его труд *«Физико-математический трактат о свете, цветах и радуге»*. В этом труде он сообщил о своем наблюдении нового явления - явления дифракции (отклонения) света. Гримальди наблюдал тени, которые отбрасывают разные тела, освещенные через небольшое отверстие. Он заметил, что свет не всегда распространяется прямолинейно. По его наблюдениям при прохождении света через узкую щель часть лучей попадает в область, где по закону прямолинейного распространения света должна быть тень. Это явление он и назвал *дифракцией («разбиением»)*.

Накопленные экспериментальные факты требовали теоретического осмысления и обобщения для построения представлений о свете и формирования методов теоретического и экспериментального исследования оптических явлений.

Корпускулярная и волновая гипотезы света

Английские ученые Бойль в 1663 г. и Гук в 1665 г. наблюдали замечательное явление, которое называется теперь *кольцами Ньютона*. Кольца возникают, когда на плоскую стеклянную пластинку помещают слабую собирающую линзу. Тогда вокруг точки контакта образуются светлые и темные кольца, окрашенные в разные цвета. Для объяснения этого явления, Гук предположил, что свет представляет собой поперечные волны, распространяющиеся от светящегося тела с одинаковой скоростью по разным направлениям в мировом эфире. Однако эти идеи не были поняты в то время. Более того, в 1672 г. Ньютон опубликовал работу *«Новая теория света и цветов»*, в которой излагалась корпускулярная (или эмиссионная) гипотеза света.

На основе этой гипотезы Ньютон объяснял периодичность светлых и темных колец тем, что частицы света, проникая в прозрачное тело, вызывают в нем сгущения и разрежения эфира. В результате, по Ньютону, образуются светлые и темные кольца. Гук выступил резко против эмиссионной гипотезы.

Поскольку эфиру приходилось приписывать разнообразные функции, то Ньютону пришлось считать, что эфир представляет собой смесь разных субстанций: *«Нельзя, однако, предполагать, что эта среда есть однородная материя; она складывается частью из основного, косного тела эфира, частью из других различных эфирных спиритусов, во многом подобно тому, как воздух слагается из косного тела воздуха, перемешанного с различными парами или выдыханиями. В пользу такой разнородности, по-видимому, говорят электрические и магнитные истечения и начало тяготения»*. Эти гипотетические соображения Ньютона находятся в явном противоречии с его же принципом: *«Гипотез не измышляю»*.

В конце концов пришлось отказаться от отождествления колебаний эфира со светом поскольку ни Ньютону, ни Гуку, не удалось объяснить прямолинейность световых лучей на основе волновых представлений, а Гюйгенс, создавший волновую теорию света, давал совсем ошибочное объяснение. Объяснения других известных фактов были сложными и гипотетическими.

Оптическими исследованиями Ньютон занимался с 1672 по 1686 гг., и свои результаты он подытожил в *«Оптике»*, изданной в 1704 г. Говоря об этой книге, Сергей Иванович Вавилов отмечал, что Ньютон: *«впервые показал миру, что может сделать и какой должна быть экспериментальная физика. Ньютон заставил опыт говорить, отвечать на вопросы, давать такие ответы, из которых вытекала теория»*. В этом и последующих изданиях *«Оптики»* Ньютон постепенно пересматривал свое отношение к эфиру. Он ставил вопрос: *«Не ошибочны ли все гипотезы, в которых свет приписывается давлению или движению,*

распространяющемуся через некоторую жидкую среду?». Одним из аргументов против эфира снова является прямолинейность света. Далее он приводил самый сильный аргумент против эфира в пространстве: *«Против заполнения неба жидкими средами, если они только не чрезвычайно разрежены, возникает большое сомнение в связи с правильными и весьма длительными движениями планет и комет по всякого рода путям в небесном пространстве, ибо отсюда ясно, что небесное пространство лишено всякого заметного сопротивления, а, следовательно, и всякой ощутимой материи»*. И все же в издании «Оптики» в 1717г. Ньютон изменил свои воззрения на эфир, хотя по-прежнему считал невозможным объяснить все свойства света с помощью гипотезы о колебаниях эфира.

Возможно, именно основное свойство света – его прямолинейное распространение – заставило Ньютона упорно держаться теории истечения световых частиц. Он считал, что эти частицы летят прямолинейно по законам механики. Отражение света рассматривалось как упругое отражение световых частиц от поверхности, аналогично падению шарика на плоскость, так что выполняется закон отражения: угол падения равен углу отражения.

Придерживаясь теории корпускулярной природы света распространяющегося в эфире Ньютон вывел закон преломления света. В этом законе фигурировала постоянная величина n – показатель преломления, определяемый свойствами обеих сред. По Ньютону выходило, что показатель преломления есть отношение скоростей частиц света во второй и первой средах. При этом получалось, что скорость света в оптически более плотной среде больше, чем в менее плотной. Во времена Ньютона прямые измерения скорости света в разных средах еще не проводились, поэтому проверить правильность выводов Ньютона было невозможно. Это было сделано позднее (опыты Фуко, 1850). Эксперименты показали, что скорость света в плотных средах, например, в воде, меньше, чем скорость света в воздухе, а показатель преломления при этом при переходе света из воздуха в воду больше единицы. Таким образом, смысл показателя преломления, данный Ньютоном, пришел в противоречие с экспериментом.

Современник Ньютона голландский физик Христиан Гюйгенс в 1690г. разрабатывал другую теорию света. Он рассматривал световые явления по аналогии с акустическими и считал, что световое возбуждение представляет собой упругие импульсы, распространяющиеся в эфире, заполняющем все пространство как внутри материальных сред, так и между ними. Материя, из которой состоят частички эфира, согласно этой гипотезе обладает *«совершенной твердостью»* и высокой упругостью. Сами частички считались одинакового размера, сферической формы и плотно прилегающими друг к другу. Поэтому перемещение одной из них должно приводить в движение целый ряд частиц во всех направлениях. Так происходит распространение сферической продольной волны. Каждая точка светящегося тела, пламени и т.д. является источником сферических световых волн. Хотя Гюйгенс говорил о световых волнах, но он представлял себе волны совсем не так, как это стали понимать позднее и

в наше время. Он считал, что свет распространяется сферическими поверхностями, и разъяснял, что это значит: *«Я называю эти поверхности волнами по сходству с волнами, которые можно наблюдать на воде, в которую брошен камень»*. При этом он вовсе не предполагал периодичности в световых явлениях, поэтому он не пользовался понятием длины волны и игнорировал уже известное в то время явление дифракции света. Он считал, что свет всегда распространяется прямолинейно независимо от размера отверстия, через которое свет проходит. По этой же причине Гюйгенс не упоминал о кольцах Ньютона, которые сам Ньютон считал примером периодичности световых явлений. В этом смысле Ньютон гораздо отчетливее, чем Гюйгенс, понимал важный элемент волновой теории – периодичность световых явлений. Наиболее ценной идеей Гюйгенса является сформулированный им *«принцип Гюйгенса»*, который гласит: *Каждая точка, до которой доходит световое возбуждение, является, в свою очередь, центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны*.

По сути, принцип Гюйгенса относится к принципу геометрической оптики, позволяющему определить направление распространения света при условии, что длина световой волны бесконечно мала по сравнению с протяженностью волнового фронта. С помощью своего принципа Гюйгенс объяснил не только законы отражения и преломления света, но также сложное явление двойного лучепреломления в исландском шпате. Вместе с тем теория Гюйгенса была не в состоянии объяснить закон прямолинейного распространения света.

Об открытии явления двойного лучепреломления сообщил в 1669 г. датский физик и математик Эразм Бартолин (1625-1698), заметивший, что при падении на кристалл луч света раздваивается. Для одного из лучей ему удалось определить показатель преломления, а второй луч вел себя странно: при разных углах падения показатель преломления оказывался разным. С тех пор луч с «нормальным поведением» называют обыкновенным, а «странный» луч - необыкновенным. Бартолин обнаружил также, что в кристалле существует направление, вдоль которого луч не раздваивается. Это направление называли оптической осью кристалла.

В течение всего XVIII в. из-за безусловного авторитета Ньютона господствовала корпускулярная теория света (теория истечения). Однако и в то время не прекращалась острая борьба между корпускулярной и волновой теориями света.

В 1746 г. Эйлер опубликовал книгу *«Новая теория света и цветов»*, в которой он отмечал основные недостатки теории истечения света

Эйлер полагал, что *«каждый простой цвет (в отличие от сложных цветов) связан с определенным числом колебаний, совершающихся за определенное время»*. Рассматривая природу света, Эйлер, как и Гюйгенс, считал, что свет представляет собой продольные колебания в эфире: *«...свет по отношению к эфиру является тем же, что звук по отношению к воздуху»*. Однако, в отличие от Гюйгенса, он явно

подчеркивал периодический характер волновой природы света. Развивая волновые представления, Эйлер впервые написал известное теперь уравнение плоской волны.

Победа волновой теории света

В начале XIX в. волновые представления о свете стали постепенно доминировать благодаря, главным образом, блестящим трудам Юнга и Френеля.

Развивая волновую теорию, молодой английский врач Томас Юнг в 1800 г. отмечал недостатки корпускулярной теории. Об одном из них он писал так:

«Каким образом происходит, что все световые лучи, возникают ли они от слабой электрической искры, от удара двух кремней, от ничтожайшей степени ощутимого глазом накаливания, распространяются с одинаковой скоростью. Какое же основание может дать теория эмиссии для того, чтобы все эти разнообразные источники света выбрасывали из себя частицы с равной скоростью?».

Как и все физики того времени. Юнг предполагал существование эфира. Объясняя отражение и преломление. Юнг впервые ввел в оптику представление об *«интерференции света»*, т.е. взаимное усиление или ослабление световых волн при их одновременном распространении.

К этому Юнг пришел, рассматривая для примера волны на воде. Считая, что свет аналогичен волнам на поверхности воды, он пришел к выводу: *«Я полагаю, что сходные эффекты имеют место всякий раз, когда таким образом смешиваются две порции света; и это я называю всеобщим законом интерференции света».*

Основываясь на этих представлениях, Юнг объяснил цвета тонких пленок и кольца Ньютона. В 1803 г. он подробно объяснил также явление дифракции. Юнг не только критиковал теорию истечения, но старался объяснить разнообразные оптические явления с помощью волновой теории и подкреплял свои объяснения экспериментом. Так он осуществил знаменитый *«опыт Юнга»* по интерференции света от двух щелей (1802), который вошел во все учебники по оптике. В 1803 г. он измерил длины волн различных цветов. Однако его работы в то время остались без внимания даже крупных физиков, зато подверглись нападкам на страницах популярных журналов. Это свидетельствовало о том, сколь сильны и живучи были корпускулярные представления Ньютона не только в научном мире.

В 1808 г. французский физик Этьен Малюс (1775-1812) случайно заметил, что при поворачивании пластинки исландского шпата вокруг луча, отраженного от окна, интенсивность света периодически возрастает и уменьшается. Это явление, возникающее при отражении света от прозрачных сред (стекла, воды и т.п.), он назвал *поляризацией света*. Он установил также закон изменения интенсивности поляризованного света (*закон Малюса*).

После открытия Малюса многие физики стали проводить экспериментальные исследования явления поляризации, и были сделаны новые важные открытия. В 1811 г. была открыта хроматическая поляризация света (Араго, Био, Брюстер).

Французский физик Доминик Араго открыл вращение плоскости поляризации света. В 1815 г. шотландский физик Дэвид Брюстер (1781-1868) показал, что тангенс угла наклона полной поляризации (*угол Брюстера*) равен показателю преломления вещества (*закон Брюстера*). В то время казалось, что эмиссионная теория подкрепляется новыми опытными данными, а позиции волновой теории подорваны.

Новый и решающий вклад в укрепление и, в конечном счете, в победу волновой теории внес скромный французский инженер управления мостов и дорог Огюстен Жан Френель (1788-1827). Не зная трудов Юнга, он в 1815г. переоткрыл принцип интерференции волн, и затем в 1816г. дополнил принцип Гюйгенса, введя представление о когерентности элементарных волн и их интерференции (*принцип Гюйгенса-Френеля*). С помощью этого принципа Френель дал вполне удовлетворительное объяснение прямолинейного распространения света и разработал теорию дифракции света (1818). Он выполнил ставшие классическими опыты по интерференции света с бисеркалами (1816) и бипризмами (1819). Эти приборы названы именем Френеля. В 1821 г. Френель доказал на опыте, что световые волны поперечны, исследуя отражение и преломление света от поверхности прозрачных веществ. Это позволило понять сущность явления поляризации, открытого Малюсом. В 1823 г. Френель установил законы отражения и преломления света на плоской неподвижной границе раздела двух сред (*формулы Френеля*), открыл эллиптическую и круговую поляризацию света.

Волновая теория Френеля была построена в период с 1815 по 1823 г. Так началось триумфальное шествие волновой оптики.

Исследуя многообразные явления поляризации света, Френель пришел к выводу, что световые волны поперечны, т.е. что направления колебаний в них перпендикулярны к направлению распространения. Однако в этом случае эфиру - тончайшему невесомому флюиду - необходимо было приписывать свойства упругого твердого тела.

Для согласования с экспериментальными фактами эфиру приходилось приписывать странные свойства и изобретать «безумные», порой фантастические теории эфира. И все равно физики не отказывались от гипотезы эфира.

До начала XIX в. корпускулярные и волновые представления о свете имели характер взаимного исключения и развивались в ожесточенной борьбе и взаимной критике при явном преимуществе корпускулярной гипотезы. После фундаментальных идей Юнга и Френеля, подтвержденных блестящими экспериментами, волновая гипотеза света одержала победу над корпускулярными представлениями. Они были полностью отброшены до открытия квантов в начале XX в. С этого времени корпускулярные представления были восстановлены, но на совершенно ином уровне понимания характера корпускул света, и природа света стала рассматриваться на основе корпускулярно-волнового дуализма. Современный этап развития оптики связан с созданием в 60-х г. XX в. новых мощных источников с высокой степенью монохроматичности и направленности излучаемого света – лазеров.

Геометрическая оптика

Геометрическая оптика, раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света на основе представлений о световых лучах. Под световым лучом понимают линию, вдоль которой распространяется поток световой энергии. Понятие луча не противоречит действительности только в той мере, в какой можно пренебрегать дифракцией света на оптических неоднородностях, а это допустимо только тогда, когда длина световой волны много меньше размеров неоднородностей. Законы геометрической оптики позволяют создать упрощённую, но в большинстве случаев достаточно точную теорию оптических систем.

Представление о световых лучах возникло ещё в античной науке. Евклид, обобщив достижения своих предшественников, сформулировал закон прямолинейного распространения света и закон отражения света. В 17 веке в связи с изобретением ряда оптических приборов (зрительная труба, лупа, телескоп, микроскоп и т.д.) и началом их широкого использования геометрическая оптика бурно развивалась.

Большая роль в этом развитии принадлежит И. Кеплеру, Р. Декарту и В. Снеллю, открывшему закон преломления света. Построение теоретических основ геометрической оптики к середине 17 века было завершено установлением Ферма принципа оптики. Этот принцип утверждает, что луч света, вышедший из одной точки и проходящий через несколько сред с произвольными границами и меняющимся показателем преломления, попадает в другую точку за минимальное (точнее, за экстремальное) время. Для однородной среды принцип Ферма сводится просто к закону прямолинейного распространения света.

Геометрическая оптика в основном объясняет образование оптических изображений, даёт возможность вычислять аберрации оптических систем и разрабатывать методы их исправления, вывести энергетические соотношения в световых пучках, проходящих через оптические системы. Вместе с тем все волновые явления, в том числе дифракционные, влияющие на качество изображений и определяющие разрешающую способность оптических приборов, не рассматриваются в геометрической оптике.

Законы преломления и отражения, исторически открытые ранее, также являются следствиями этого принципа, который сыграл значительную роль в развитии и др. разделов физической теории. С 18 века геометрическая оптика, совершенствуя методы расчёта оптических систем, развивалась как прикладная наука. После создания электродинамики классической было показано, что формулы геометрической оптики могут быть получены из уравнений Максвелла в качестве предельного случая, соответствующего переходу к исчезающе малой длине волны.

Геометрическая оптика является примером теории, позволившей при малом числе фундаментальных понятий и законов (представление о лучах света, законы отражения и преломления) получать много практически важных результатов. В теории оптических устройств она сохранила большое значение до настоящего времени.

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ СВЕТА

Корпускулярные и волновые представления о свете считались в XIX в. противоречащими друг другу. Поэтому победа волновой теории света означала полный крах корпускулярной теории Ньютона и ее забвение. Между тем конец XIX в. был ознаменован важным открытием — *фотоэлектрического эффекта*, объяснение которого никак не укладывалось в рамки классической электродинамики.

Этот эффект случайно открыл Генрих Герц в 1887 г. В то время Герц был всецело увлечен доказательством существования электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом. Поэтому обнаруженный эффект его не заинтересовал. Этот эффект, названный впоследствии фотоэлектрическим или просто *фотоэффектом*, переоткрыли в 1888г. немецкий физик Вильгельм Гальвакс, итальянский физик Аугусто Риги (1850-1921) и Александр Григорьевич Столетов (1839-1896). Гальвакс показал, что при освещении ультрафиолетовым излучением металлическая пластинка заряжается положительно. Риги впервые наблюдал фотоэффект в случае диэлектриков (эбонит, сера) и предложил термин «фотоэлемент». Первый реально действующий фотоэлемент создал и применил его на практике Столетов. Он же открыл один из законов фотоэффекта – прямую пропорциональность силы фототока от интенсивности падающего света, и обнаружил фототок насыщения. В 1899 г. Дж. Дж. Томсон и немецкий физик Филипп Ленард определили удельный заряд частиц, вылетающих с поверхности освещаемого тела. Он оказался таким же, как для катодных лучей. Так было доказано, что с освещаемой поверхности вылетают электроны. В 1902 г. Ленард установил, что энергия вылетающих электронов совершенно не зависит от интенсивности падающего света и прямо пропорциональна его частоте. Этот факт невозможно объяснить на основе классических представлений. Действительно, по классическим представлениям электрон в световом поле совершает колебания, амплитуда которых должна возрасть с увеличением интенсивности волны. Тогда, естественно, должно расти количество электронов, способных вырваться с поверхности тела. Этого, однако, не наблюдается.

Полное понимание всех законов фотоэффекта стало возможным лишь после великого открытия в физике – открытия квантов энергии и постоянной Планка. 14 декабря 1900 г. для объяснения законов теплового излучения черного тела Макс Планк ввел гипотезу о том, что энергия излучения распространяется отдельными порциями, *элементами энергии* и открыл квант действия. Элемент энергии по Планку равен $\varepsilon = \hbar\nu$, где \hbar - *постоянная Планка*, ν - частота излучения.

Для объяснения механизма распространения «элементов» или «единиц энергии», как их тогда называли, были возможны два варианта: эти элементы энергии после излучения сохраняют свою индивидуальность при распространении, или каждый излучаемый элемент рассеивается в пространстве по мере удаления от источника.

Первый вариант не совместим с классической оптикой, которая основана на волновом характере распространения электромагнитного излучения. Планк, несмотря на революционность своего открытия, воспитанный в духе старой, доброй классической физики, был ревностным ее хранителем, и, как многие в то время, не мог смириться с тем, что хорошо проверенная на опыте волновая теория имеет ограниченную область применимости. Поэтому вначале он считал, что процесс испускания и поглощения происходит дискретными порциями, а само излучение является непрерывным. В противоположность Планку Альберт Эйнштейн первый осознал революционный характер введенной Планком квантовой идеи и развил ее дальше.

В 1905 г. Эйнштейн в своей работе *«Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света»* высказал мысль о том, что *«элементы энергии»* обладают особой индивидуальностью, и ввел гипотезу световых квантов.

В этой работе он писал: *«Я и в самом деле думаю, что опыты, касающиеся "излучения черного тела", фотолюминесценции, возникновения катодных лучей при освещении ультрафиолетовыми лучами и других групп явлений, связанных с возникновением и превращением света, лучше объясняются предположением, что энергия света распределяется по пространству дискретно... Энергия пучка света, вышедшего из некоторой точки, не распределяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком... Изложенные выше рассуждения, по моему мнению, отнюдь не опровергают теорию излучения Планка; напротив, они, по-видимому, показывают, что Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент — гипотезу световых квантов».*

Эйнштейн не ограничился только высказыванием гипотезы световых квантов. Прежде всего, идею о световых квантах он применил для объяснения фотоэлектрического эффекта. Используя гипотезу о световых квантах, Эйнштейн в 1905 г. получил уравнение энергетического баланса при фотоэффекте:

$$E_{\max} = h\nu - W,$$

где E_{\max} - максимальная энергия вылетающих электронов, W - работа выхода,

т.е. энергия, необходимая для удаления электрона из вещества. Из этой формулы следует, что максимальная энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты, в согласии с результатом Ленарда, причем угол наклона прямой $E_{\max}(\nu)$ не зависит от вещества и определяется лишь постоянной Планка. Так впервые был показан универсальный характер постоянной Планка, которая определяет закономерности в совершенно различных физических явлениях. Против гипотезы Эйнштейна решительно выступил Планк, ее также не принял великий датский физик Нильс Бор.

Подробную экспериментальную проверку уравнения Эйнштейна для фотоэффекта выполнял в 1914-1916 гг. Роберт Милликен. Впоследствии он писал: *«Я потратил 10 лет моей жизни на проверку этого эйнштейновского уравнения 1905 года, и вопреки всем моим ожиданиям я вынужден был в 1915 году безоговорочно признать, что оно экспериментально подтверждено, несмотря на его несуразность, так как казалось, что оно противоречит всему, что мы знаем об интерференции света».*

Это еще раз говорит о том, что в то время многие физики считали гипотезу Эйнштейна чуть ли не сумасшедшей идеей. Несмотря на успешные опыты Милликена и других эта гипотеза не вызывала доверия у физиков того времени. Характерен такой эпизод. Когда в 1913 г. Планк, Нернст, Рубенс и Варбург выдвинули Эйнштейна в члены Прусской академии наук, они в заключение своей рекомендации писали: *«В целом можно сказать, что вряд ли найдется какая-нибудь из важных проблем современной физики, в решение которой Эйнштейн не внес бы замечательного вклада. То, что он иногда не попадает в цель, как, например, в случае гипотезы световых квантов, нельзя считать отрицательным аргументом, поскольку невозможно выдвинуть новую идею, даже в наиболее точной науке, без некоторой доли риска».* Многие физики того времени считали, что кванты света не представляют никакой физической реальности, а являются лишь удачным эвристическим способом определения некоего количества энергии, связанного, возможно, с какой-то особенностью электромагнитного поля, т.е. квант света рассматривался лишь как некая мера, а не как своеобразная корпускула. В 1921 г. Нобелевский комитет сформулировал присуждение премии Эйнштейну *«за вклад в теоретическую физику, и особенно за открытие закона фотоэффекта»*, но при этом даже не было упомянуто ни об открытии квантов электромагнитного поля, ни о создании теории относительности.

Тем не менее, по мере того, как все новые и новые явления могли быть объяснены лишь в рамках квантовых представлений, происходило медленное и постепенное признание физической реальности квантов. Отрицательное отношение физиков к гипотезе световых квантов объясняется тем, что эта гипотеза возвращала корпускулярные представления о свете. Все хорошо помнили, как после долгих лет дискуссий ньютоновские корпускулярные представления были решительно отброшены, поскольку с их помощью невозможно было объяснить ни закона преломления света, ни интерференции, ни дифракции. Между тем, световые кванты не могут иметь ничего общего с ньютоновскими корпускулами света. Квант света является особой частицей, распространяющейся со скоростью света в вакууме. Однако квант света оставался гипотетической частицей, пока его существование не было доказано в эксперименте.

В период с 1921 по 1924 г. в ряде опытов было замечено, что при рассеянии рентгеновских лучей веществом возникают более «мягкие» лучи, т.е. излучение с большей длиной волны (*некогерентное рассеяние*). Такой результат противоречил

теории рассеяния излучения, разработанной в 1906 г. Дж. Дж. Томсоном на основе классических представлений. Американский физик Артур Комптон (1892-1962) решил найти объяснение опытным фактам по некогерентному рассеянию рентгеновского излучения. Все попытки понять их на основе классических представлений оказались безуспешными. Тогда в 1923 г., основываясь на гипотезе Эйнштейна о световых квантах, Комптон задался вопросом: *«Что должно произойти, если каждый квант энергии рентгеновских лучей сконцентрирован в одной частице и действует как целое на отдельный электрон?»*

Комптон исследовал рассеяние жесткого рентгеновского излучения средами, состоящими из легких атомов (графит, парафин). Опыты Комптона показали, что рассеянное излучение содержит в себе в зависимости от угла рассеяния две компоненты - у одной длина волны такая же, как у падающей волны, а у другой - больше. Это явление называют *эффектом Комптона*. Комптон и Дебай показали, что объяснить этот эффект можно только на языке столкновения рентгеновского кванта со свободным электроном. Пользуясь законами сохранения энергии и импульса в системе электрон-фотон, Комптон нашел, что в результате столкновения с электроном длина волны рассеянного излучения отличается от длины волны падающего излучения на величину $\Delta\lambda \equiv \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \Theta/2$

Новая фундаментальная физическая постоянная $\lambda_c = \hbar/m_0c = 2,4 \cdot 10^{-10}$ см стала называться *комптоновской длиной*.

Эксперименты Комптона полностью подтвердили полученную им формулу, определяющую длину волны рассеянного излучения.

Таким образом, Комптон экспериментально доказал *существование квантов света*. Значение этого открытия в физике было огромным. Вспоминая бурное время ломки классических понятий и представлений, Бор писал в 1955 г.: *«Широта научного кругозора Эйнштейна и прямота его ума наиболее ярко проявились в том, что в те самые годы, когда он дал широчайшее обобщение классической физике, он четко осознавал тот факт, что открытие Планком универсального кванта действия накладывает определенные ограничения на такой подход. Удивительная интуиция Эйнштейна привела его к представлению о фотонах как носителях энергии и импульса в индивидуальных процессах излучения. Тем самым он нашел отправную точку для создания последовательных квантово-теоретических методов, которые позволили объяснить огромное количество экспериментальных данных, относящихся к свойствам материи, и, более того, привели к необходимости пересмотра наших основополагающих понятий»*.

Эксперименты, подтвердившие гипотезу Эйнштейна о световых квантах, проводили также российские физики А.Ф. Иоффе (1880-1960) и Н.И. Добронравов (1891-1949) в 1924 г.

В 1926 г. американский физико-химик Гильберт Льюис (1875-1946) назвал квант света *фотоном*. Этот термин сразу же был принят физиками. Фотон является

элементарной частицей с нулевой массой, нулевым электрическим зарядом и спином, равным 1.

Эксперименты последнего времени показывают, что масса фотона близка к нулю с огромной точностью. Вместе с тем, теоретики уже подготовили уравнения, обобщающие систему уравнений Максвелла на случай ненулевой массы фотона. Такие уравнения сформулировал в 1936 г. румынский физик Александр Прока (1897-1955).

Однако фотон – очень своеобразная частица. Он не является пространственно локализованным объектом и нельзя определить его положение в пространстве. Фотон движется со скоростью света, поэтому он не может находиться в состоянии покоя. Наряду с этим, как показывают многие опыты (флуктуации концентрации фотонов в световом пучке, селективный фотоэффект и др.), к отдельному фотону применимо понятие поляризации. Более того, как и для электромагнитных волн, для фотонов также наблюдается явление интерференции, причем при наличии лишь одного фотона.

В результате теоретических расчетов и экспериментов к 1925 г. было твердо установлено, что в ряде физических явлений свет ведет себя как частица с вполне определенными энергией и импульсом. С другой стороны, многочисленные эксперименты XIX в. по интерференции, дифракции и поляризации света столь же убедительно показали, что свет обладает волновыми свойствами. Так возникла острая проблема *корпускулярно-волнового дуализма* света, которая, казалось, загнала физику в тупик. Выход из этого тупика был найден позднее, когда была создана современная квантовая теория.

Скорость света

Скорость света - одна из важнейших физических величин, которые называются фундаментальными постоянными. Выразить ее через другие постоянные невозможно, поэтому единственным способом определения скорости света является эксперимент. Первую попытку определить скорость света предпринял Галилей в 1607 г. Однако оно слишком грубым и неточным, при огромной скорости света фактически измерялось не время распространения светового сигнала, а время, потраченное на реакцию. Поскольку реакция считалась мгновенной, то можно было прийти к выводу о бесконечной скорости света.

Первое реальное измерение скорости света осуществил в 1676 г. Рёмер, наблюдая затмения спутников Юпитера.

Объектом исследования Рёмера был один из известных тогда четырех спутников - Ио. Наблюдая достаточно долго за его обращением, можно с большой точностью определить, когда спутник, вначале закрытый тенью Юпитера, будет виден наблюдателю с Земли. По расчетам Рёмера наблюдение затмений спутника Ио происходит с запаздыванием, вызванным тем, что свет распространяется с конечной скоростью. На основе данных того времени о диаметре орбиты Земли и результатов своих наблюдений он вычислил значение скорости света: $c = 301 \cdot 10^6$ м/с. Расчеты

Рёмера были не очень точными, но они впервые показали, что для определения движения планет и их спутников необходимо учитывать конечную величину скорости распространения света. Доклад Рёмера по этому вопросу в Парижской академии наук вызвал бурю протеста, поскольку его вывод противоречил принятым тогда во Франции воззрениям Декарта. Лишь Гюйгенс поддержал Рёмера, поскольку видел в его открытии веский аргумент в пользу волновых представлений о свете. В 1725-1728 гг. был использован другой астрономический метод, основанный на наблюдениях *абберации звезд* – видимого годичного смещения звезд. Из этих измерений следовало, что скорость света равна $c = 308\,000$ км/с. Более ста лет спустя российский астроном В.Я. Струве значительно улучшил точность подобных измерений.

Лабораторные методы измерения скорости света по существу основаны на усовершенствовании метода Галилея. Первое лабораторное измерение скорости света выполнил в 1849 г. французский физик Физо, используя *метод зубчатого колеса*. По его измерениям $c = (315\,300 \pm 500)$ км/с.

Французский физик Мари Альфред Корню (1841-1902), оценивая значение метода Физо, говорил, что этот метод *«был первым по времени методом, позволившим измерить скорость света на поверхности Земли без привлечения к этому астрономических явлений. Это - первостепенное открытие не только по трудности решенной задачи, но также благодаря осуществлению оптической установки, изумительной по тонкости и точности... Создать светящуюся почти микроскопическую точку между зубцами колеса, направить выходящий из нее расходящийся пучок на несколько десятков километров, заставить его там отразиться от зеркала и вернуть его к исходной точке - это результат, который был бы признан невозможным, вероятно, даже абсурдным, если бы он был предложен до своей реализации»*.

В 1850 г. французский физик Жан Фуко (1819-1868) по инициативе Араго разработал метод измерения скорости света с *помощью вращающегося зеркала*, и измерил скорость света в воздухе и воде. Согласно его измерениям скорость света в воде составила $\frac{3}{4}$ скорости света в воздухе. Это окончательно подтвердило волновую теорию света. В 1862 г. он возобновил измерения скорости света в воздухе и получил для нее значение $c = (298\,000 \pm 500)$ км/с. В дальнейшем измерения по методу вращающегося зеркала привели к следующим результатам:

Ньюкомб (1891г.) - $c = 299\,810 \pm 50$ км/с.

Майкельсон (1902г.) - $c = 299\,890 \pm 60$ км/с.

Майкельсон (1926г.) - $c = 299\,796 \pm 4$ км/с.

Использование микроволновой интерферометрии позволило существенно повысить точность измерений: $c = (299\,792,2 \pm 0,2)$ км/с (Фрум, 1958). Наиболее точную величину скорости света определили с помощью независимых измерений длины волны и частоты лазерного излучения: $c = (299\,792,4562 \pm 0,0011)$ км/с (Ивенсон, 1972).

По соглашению метрологов с 1983 г. принято, что скорость света имеет *точное значение* $c = 299\,792\,458$ м/с. Дело в том, что необходимо было согласовать эталоны длины и времени. За единицу длины 1 м принимается длина пути, который проходит свет за время равное $1/(299\,792\,458)$ с. Согласованность результатов измерений скорости света разными методами является новым убедительным доказательством правильности идеи Максвелла об электромагнитной природе света, которая им была высказана лишь на основе грубо установленного в то время равенства скорости света и электродинамической постоянной.

Лабораторные методы измерения скорости света позволили также непосредственно проверить закон преломления света с помощью измерения показателя преломления.

Поиски эфира

Построенная Максвеллом электродинамика прекрасно описывает электромагнитные явления, происходящие в неподвижных средах. При этом длительное время предполагалось, что существует некая светоносная среда - эфир, через которую в свободном от вещества пространстве распространяются световые волны. Принимая гипотезу эфира и обсуждая теории того времени, Максвелл в своем трактате писал: *«Все эти теории естественным образом вызывают вопрос: если нечто передается от одной частицы к другой на расстояние, каково состояние этого нечто после того, как оно покинуло одну частицу и ещё не достигло другой? Если это нечто есть потенциальная энергия двух частиц, как в теории Неймана, то должны ли мы рассматривать эту энергию как существующую в какой-то точке пространства, не совпадающей ни с той, ни с другой частицей? Действительно, каким бы способом энергия не передавалась от одного тела к другому во времени, должна быть среда или субстанция, в которой энергия существует после того, как она оставила одно тело и еще не достигла другого...»*, (Д. К. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. - М.: Гостехиздат, 1954, с. 632).

В конце XIX в. важнейшей проблемой стала электродинамика движущихся сред. Это было вызвано, с одной стороны, практическими задачами (изобретение радио, проблемы связи, изобретение электрических машин и т.п.), а с другой стороны, - проблемой эфира, в особенности вопросом о взаимоотношении движущегося вещества и эфира.

Первую попытку построить электродинамику движущихся сред предпринял Генрих Герц в 1890 г. Он исходил из гипотезы, что *эфир полностью увлекается* движущимися в нем материальными телами. Созданная Герцем на этой основе электродинамика, естественно, приводила к большим трудностям и противоречила ряду экспериментов, в первую очередь, опыту Физо (1850). Это был интерференционный опыт, в котором интерферирующие световые пучки проходили по заполненным водой сообщающимся трубам одинаковой длины.

Интерференционная картина наблюдалась в случае неподвижной и движущейся в трубах воды. Измерялось смещение интерференционных полос, которое, однако, не соответствовало расчетам, проведенным по теории Герца, - полностью увлекаемого эфира. Зато результаты опыта согласовывались с теорией Френеля, сформулированной им еще в 1818 г. Френель предполагал, что при движении тел происходит *частичное увлечение эфира*. По его расчетам *коэффициент увлечения эфира* меньше единицы, например, для воды равен 0,438.

В 1886 г. Майкельсон и Морли (1838-1923) провели более точные измерения и нашли, что коэффициент $k = 0,434 \pm 0,020$. Таким образом, теория Герца, согласно которой коэффициент увлечения должен быть равен единице, находилась в резком противоречии с экспериментом. Эта теория противоречила и электродинамическим опытам, по теории полностью увлекаемого эфира невозможно было объяснить также аберрацию света.

Лоренц исходил из гипотезы о неподвижном эфире, который никак не участвует в движении материальных тел. По Лоренцу, эфир - единственный в природе изотропный диэлектрик. Так считал и Максвелл. Гипотеза неподвижного эфира находилась в согласии с надежно установленным явлением аберрации звезд. Абберация объяснялась тем, что происходит геометрическое сложение двух скоростей - «абсолютной» скорости света, идущего от звезды, и «абсолютной» скорости Земли относительно неподвижного эфира. При орбитальном движении Земли в эфире со скоростью 30 км/с навстречу ей должен дуть «эфирный ветер». Считалось также, что движение Земли должно отражаться на электромагнитных явлениях, наблюдаемых на Земле. При этом предполагалось, что для электромагнитных явлений остается справедливым принцип относительности Галилея и вытекающий из него закон сложения скоростей. Тогда скорость света, излученного в направлении движения Земли, должна уменьшиться на 30 км/с, а в обратном направлении - на столько же увеличиться.

Важную роль в решении этой проблемы играли опыты Майкельсона-Морли 1881-1887 гг. показавшие, эфир полностью увлекается Землей при ее движении. Другими словами, опыты Майкельсона-Морли доказали *отсутствие эфирного ветра*.

Отрицательный результат их опытов стал полной неожиданностью для физиков того времени. Тщательный анализ этого результата неизбежно приводил к выводу, который сформулировал Анри Пуанкаре в 1895 г.: «...невозможно обнаружить абсолютное движение весомой материи и эфира». Таким образом, опыты Майкельсона, Физо и других завели представления об эфире в тупик. Оказалось, что эфир должен обладать странными свойствами: приземные слои эфира полностью увлекаются движущейся Землей, а эфир, находящийся в промежутках между молекулами жидкости, лишь частично увлекается при ее движении. Главное же оказалось, что для электромагнитных явлений, как и для механических, не существует абсолютной, выделенной системы отсчета.

В дальнейшем предпринимались многократные попытки обнаружить эфирный ветер. Однако они давали отрицательный результат. Для преодоления трудностей эфирной проблемы Лоренц в 1892 г. предложил парадоксальную гипотезу. Он считал, что размеры любого тела, движущегося в эфире поступательно со скоростью v , должны уменьшаться в направлении его движения в $1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ раз. Такую же гипотезу высказал независимо в том же году английский физик Фитцджеральд.

Гипотеза Лоренца-Фитцджеральда о сокращении длин (*лоренцовское сокращение*) согласовывалась с результатами опытов Майкельсона-Морли, но приводила к новой трудности. Если эта гипотеза верна, то в движущемся теле должна возникать анизотропия, которая должна была бы приводить к некоторым электромагнитным явлениям. Например, у всех движущихся прозрачных тел следовало ожидать двойного лучепреломления света, причем двойное лучепреломление должно было бы наблюдаться в самой движущейся системе, т.е. на Земле. Однако тщательные опыты, которые выполнили Рэлей и Брейс в 1902-1904 гг., не обнаружили никакого двойного лучепреломления, вызванного движением Земли.

Для объяснения этих фактов Лоренц в 1904 г. предложил новую гипотезу о существовании «*соответственных состояний*», согласно которой связь между переменными в движущемся теле должна быть такой же, как и между абсолютными значениями переменных. Это значит, что уравнения поля для соответственных состояний должны быть инвариантными, т. е. не зависеть от выбора системы отсчета, движущейся относительно эфира.

Так возникли преобразования Лоренца, в которых преобразовывалось также время:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt/\sqrt{1 - v^2/c^2} \\y &= y, \\z &= z, \\t' &= (t - xv/c^2)/\sqrt{1 - (v/c)^2}.\end{aligned}$$

Величину t' Лоренц называл «*местным временем*». Он считал ее чисто вспомогательной математической величиной и не придавал ей никакого реального физического смысла.

Анализируя отрицательный результат опытов Майкельсона-Морли, Пуанкаре считал его проявлением некоего общего закона природы о невозможности обнаружить абсолютное движение. В 1904 г. он писал: «*Законы физических явлений будут одинаковы как для покоящегося наблюдателя, так и наблюдателя, находящегося в состоянии равномерного поступательного движения, так что мы не имеем и не можем иметь никаких средств, чтобы различить, находимся ли мы в таком движении или нет*». Сформулированное положение Пуанкаре в 1906 г. назвал «*постулатом относительности*», который должен быть справедлив как для механических, так и для электромагнитных явлений. Пуанкаре показал инвариантность уравнений Максвелла относительно преобразований Лоренца, и по его предложению

преобразования координат и времени стали называть преобразованиями Лоренца. Пуанкаре ввел мнимую 4-ю координату времени *ict* и рассмотрел преобразования Лоренца как поворот системы координат в 4-мерном пространстве. Он предвосхитил некоторые результаты, полученные потом Эйнштейном. Но все же он, как и Лоренц, не вышел за рамки классической электродинамики и механики.

Лоренц пытался сохранить основы классических представлений, вводя все новые и новые гипотезы. Такой подход в науке называют методом «нарастания гипотез», и он сводит процесс познания к простому суммированию отдельных результатов, т.е. процесс познания рассматривается как аддитивный процесс. По этому поводу Эйнштейн говорил: *«...часто, если не всегда, можно сохранить данную общую теоретическую основу, если только приспособлять ее к фактам при помощи более или менее искусственных предположений»*.

Сам Эйнштейн стал примером революционных преобразований в физике.

КАК БЫЛА СОЗДАНА ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В 1905 г. в авторитетном научном журнале *«Annalen der Physik»* была опубликована статья молодого ученого Альберта Эйнштейна, который работал в то время экспертом 3-го класса патентного бюро в Берне, в Швейцарии. Эта статья называлась *«К электродинамике движущихся сред»*. В ней Эйнштейн последовательно разработал основы *частной теории относительности* и применил ее к важнейшим вопросам физики.

Термин «теория относительности» ввел Планк в 1906 г. Во введении своей статьи Эйнштейн писал: *«...неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды» ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике нет явлений, соответствующих понятию абсолютного покоя; более того, мы должны предположить, что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы одинаковые электродинамические и оптические законы... Это предположение, которое мы в дальнейшем будем называть «принципом относительности», мы намерены превратить в предпосылку и, кроме того, сделать допущение, находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии, а именно, что свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью, не зависящей от состояния движения излучающего тела...»*

Введение «светоносного эфира» окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится «абсолютно покоящееся пространство», наделенное особыми свойствами».

Как впоследствии отмечал Эйнштейн, образцом построения теории для него была термодинамика, основанная на общих принципах - «началах». Общий принцип частной теории относительности (ЧТО) заключается в постулате - *законы физики инвариантны относительно преобразований Лоренца*. Содержание этого постулата заключено в двух «началах» - постулатах ЧТО:

1. *Принцип относительности.* Явления во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково.

2. *Принцип постоянства скорости света в вакууме.* Скорость света в вакууме не зависит от движения источников или приемников и является универсальной постоянной.

Инерциальная система отсчета. Положение движущегося тела в каждый момент времени определяется по отношению к некоторому другому телу, которое называется системой отсчета. Особо выделяется инерциальная система, которые находятся относительно друг друга либо в покое, либо в равномерно и прямолинейном движении. Для таких систем выполняется принцип относительности: во всех инерциальных системах все механические процессы происходят одинаковым образом.

Иначе говоря, законы движения тел выражаются той же самой математической формой – являются инвариантными.

Как один из основателей термодинамики немецкий физик Клаузиус отказался от гипотезы теплорода, так и Эйнштейн отказался от гипотезы эфира, как «излишней». Обосновывая отказ от гипотезы эфира, Эйнштейн отмечал, что непротиворечивая электродинамика движущихся сред может быть построена, если только положить в основу теорию Максвелла для покоящихся сред. При этом он считал, что необходимо правильно толковать теорию Максвелла. Он писал:

«Известно, что электродинамика Максвелла, как ее в настоящее время обыкновенно толкуют, в применении к движущимся телам приводит к асимметрии, которая, по-видимому, несвойственна самим явлениям». Так, появление тока в замкнутом проводнике при его взаимодействии с магнитом обычно объясняли двумя причинами - когда движется проводник, и - когда движется магнит. По этому поводу Эйнштейн писал: «Если число силовых линий, пересекающих поверхность проводника, изменяется с течением времени, то в проводнике возникает ток. Известно, что возникший ток зависит только от изменения потока через проводник. Величина этого изменения зависит только от относительного движения полюса по отношению к проводнику, иначе говоря, с точки зрения конечного результата, безразлично, будет это движущийся полюс и неподвижный проводник, или же наоборот. Чтобы понять это явление с точки зрения теории эфира, необходимо приписать последнему состояния, в корне различные в зависимости от того, полюс или проводник движутся относительно эфира». Таким образом, показав на этом примере, что здесь на самом деле имеется одна, а не две причины, Эйнштейн пришел к общему выводу: «В конце концов, подобное раздвоение, чуждое природе явлений, вводится всякий раз, как только приходится обращаться к факту существования эфира для объяснения явлений, вызванных относительным движением двух тел». К числу таких явлений Эйнштейн относил, в частности, «безуспешные попытки» обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды».

Как писал Паули, *«...частная теория относительности стала первым шагом на пути отказа от наивных наглядных представлений. В ней было покончено с представлением об эфире - гипотетической среде, вводимой ранее для описания распространения света. Это случилось не только потому, что такая среда оказалась ненаблюдаемой, но также и потому, что в качестве элемента математического формализма она оказалась лишней, так как нарушала присущие этому формализму теоретико-групповые свойства».* Постулаты ЧТО приводят к инвариантности всех законов природы относительно группы Лоренца. С точки зрения математики теория относительности является теорией инвариантов группы Лоренца.

Постулат о постоянстве скорости света Эйнштейн разъяснял следующим образом. Скорость света входит в уравнения Максвелла как некоторая константа, которая не зависит от пространственных координат, времени и переменных электромагнитного поля. Если бы при переходе в другую инерциальную систему

отсчета скорость света изменялась, то это вступало бы в противоречие с принципом относительности. В самом деле, в этом случае изменилась бы форма уравнений Максвелла, а это противоречит опыту. Таким образом, заключает Эйнштейн: *«Если мы хотим сохранить принцип относительности, мы обязаны допустить справедливость постоянства скорости света для любой системы, движущейся без ускорения»*.

Постулаты ЧТО привели также к пересмотру представлений о пространстве и времени. Если у Лоренца «местное время» есть вспомогательная математическая величина в противоположность «действительному» времени, то в теории Эйнштейна *«пространственные и временные данные имеют не фиктивное, а физически реальное значение»*. Пространство и время образуют взаимосвязанный четырехмерный мир. Этой идее придал изящную математическую форму немецкий математик и физик Герман Минковский (1864-1909).

Рассматривая два события, происходящие в точках пространства \vec{r}_1 , и \vec{r}_2 соответственно, в моменты времени t_1 и t_2 , Минковский ввел «расстояние» между пространственно-временными точками:

$$s = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2}.$$

Эта величина, являющаяся релятивистским инвариантом, получила название *интервала*. Пространственно-временное многообразие Минковский назвал *миром*, а отдельную точку этого многообразия - *мировой точкой*. Движение материальной точки изображается множеством мировых точек, которое называют *мировой линией*. В зависимости от знака квадратичной формы под знаком радикала интервал может быть действительной, мнимой или нулевой величиной. С учетом этого обстоятельства рассматривают качественно различные интервалы:

времениподобный ($s^2 > 0$), *пространственно-подобный* ($s^2 < 0$), *нулевой* ($s^2 = 0$). Два события, разделенные пространственно-подобным интервалом, не могут быть причинно связанными. Для событий, разделенных времениподобным интервалом, можно рассматривать порядок следования событий, остающийся неизменным в любой инерциальной системе отсчета, несмотря на относительность одновременности. В геометрии Минковского на плоскости преобразования Лоренца представляют собой гиперболический поворот.

Теория Эйнштейна вызвала вначале «смятение умов» и скептическое отношение к ней некоторых физиков. Первое время Лоренц неодобрительно воспринимал теорию Эйнштейна, все еще не оставляя попыток спасти свои представления. Вскоре, однако, Лоренц признал правоту Эйнштейна, и в 1912 г. он писал: *«Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он первый высказал принцип относительности в виде всеобщего, строго и точно действующего закона»*.

Надо сказать, что принцип относительности формулировал и Пуанкаре. Он считал, что любой метод измерения абсолютных свойств движения должен быть

исключен. В сентябре 1904 г. Пуанкаре изложил принцип относительности в формулировке: *«Законы физических явлений должны быть одинаковыми для неподвижного наблюдателя и для наблюдателя, совершающего равномерное поступательное движение, так что мы не имеем и не можем иметь никакого способа определить, находимся ли мы в подобном движении или нет»*. Другими словами, Пуанкаре считал, что относительность заключается в том, что нет способа отличить состояние абсолютного покоя от движения по инерции. В 1906 г. Пуанкаре опубликовал статью «О динамике электрона», в которой он пришел к выводу: *«...невозможность показать опытным путем абсолютное движение Земли представляет, по-видимому, общий закон природы; мы естественно приходим к тому, чтобы принять этот закон, который мы назовем постулатом относительности, и принять без оговорок. Все равно, будет ли позднее этот постулат, до сих пор согласующийся с опытом, подтвержден или опровергнут более точными измерениями, сейчас, во всяком случае, представляется интересным посмотреть, какие следствия могут быть из него выведены»*.

С математической стороны Пуанкаре получил основные результаты теории Эйнштейна и в некоторой мере предвосхитил формулировку теории относительности, которую впоследствии развил Минковский. Однако его физическая интерпретация постулата относительности сохранила лишь исторический интерес. Пуанкаре был блестящим математиком. Он очень близко подошел к идее Эйнштейна, но, как говорил Луи де Бройль, Пуанкаре *«так и не сделал решающего шага и предоставил Эйнштейну честь разглядеть все следствия из принципа относительности»*. Причина этого заключается в концепции познания Пуанкаре. Он считал, что существование материальных объектов - это *«удобная гипотеза»*, а принятые физические понятия и определения *«являются лишь плодом неосознанного соглашения»*. Он не рассматривал теорию как отражение внешнего мира. Для него теория - лишь система упорядочения восприятий, которая может реализовываться в различных формах, по соглашению, ради удобства. В частности, относительно свойств пространства и времени он говорил, что *«Не природа навязывает их нам, а мы налагаем их на природу, потому что мы находим их удобными»*. Отмечая эту черту Пуанкаре, Луи де Бройль писал, что, будучи прекрасным математиком, Пуанкаре *«занимал по отношению к физическим теориям несколько скептическую позицию, считая, что вообще существует бесконечно много логически эквивалентных точек зрения и картин действительности, из которых ученый, руководствуясь исключительно соображениями удобства, выбирает какую-то одну. Вероятно, такой номинализм иной раз мешал ему признать тот факт, что среди логически возможных теорий есть такие, которые ближе к физической реальности, во всяком случае, лучше согласуются с интуицией физика, и тем самым больше могут помочь ему»*.

В противоположность Пуанкаре Эйнштейн считал, что принцип относительности есть обобщение научного опыта и часто ссылаясь на этот опыт. Как проявление этого принципа, можно не сомневаться, что два физика, находящихся со

своими измерительными приборами в двух различных инерциальных системах, откроют тождественные законы природы. Отмечая же роль науки, Эйнштейн много лет спустя говорил:

«В своей долгой жизни я познал одну истину, что вся наша наука кажется примитивной и неразвитой, если ее сравнить с реальностью, и все же это самая большая драгоценность, которой мы обладаем».

Иногда говорят, что вся теория относительности была фактически подготовлена еще до Эйнштейна, а ему оставалось только сделать заключительный обобщающий шаг. В действительности вся логическая система частной теории относительности (ЧТО) развивалась самим Эйнштейном. Ему не нужны были бесконечные «нагромождения гипотез». Как писал выдающийся немецкий физик Вольфганг Паули, *«Основы новой теории были доведены до известного завершения Эйнштейном. Его работа 1905 г. была направлена в печать почти одновременно с сообщением Пуанкаре и написана без осведомленности о работе Лоренца 1904 г. Исследование Эйнштейна содержит не только все существенные результаты обоих названных работ, но также, прежде всего, изложение совершенно нового и глубокого понимания всей проблемы».* Сам Эйнштейн разъяснял: *«Частная теория относительности выросла из электродинамики и оптики. Она мало изменила положения этих теорий, но значительно упростила теоретические построения, т.е. вывод законов, и - что несравненно важнее - заметно уменьшила число не зависящих друг от друга гипотез, лежащих в основе теории. Теория относительности придала теории Максвелла-Лоренца такую степень очевидности, что физики были бы полностью убеждены в ее справедливости даже в том случае, если бы эксперимент говорил бы в ее пользу не столь убедительно».*

Оценивая роль и значение теории относительности Эйнштейна для развития физики, Паули писал: *«Теорию относительности я рассматриваю как пример, показывающий, как фундаментальное научное открытие, иногда даже вопреки воле его автора, дает начало новым плодотворным направлениям, развитие которых происходит уже по их собственному пути».*

Иногда встречаются работы, в которых, по мнению их авторов, «ниспровергаются» постулаты теории относительности. Так, в 1962 г. американский физик Кантор утверждал, что его эксперимент опровергает постулат о постоянстве скорости света - о независимости скорости света от скорости источника света. Однако многочисленные опыты, выполненные с огромной точностью, не обнаружили отклонений от постулатов теории.

Наиболее точные измерения проводились с использованием лазеров. Такие измерения установили независимость скорости света от скорости движения источников с точностью до 0,03 мм/с. Был также выполнен эксперимент по проверке независимости скорости света от направления (современный вариант опыта Майкельсона-Морли). Результат Майкельсона-Морли был подтвержден с колоссальной точностью – $1,7 \cdot 10^{-15}$.

«Парадоксы» теории относительности

С точки зрения обыденных представлений и «здравого смысла» многие следствия теории относительности выглядят как «парадоксы».

1. Прежде всего, кажется, что постулаты Эйнштейна противоречат друг другу. Это отмечал сам Эйнштейн: *«принцип постоянства скорости света и принцип относительности противоречат один другому только до тех пор, пока сохраняется постулат абсолютного времени, т.е. абсолютный смысл одновременности. Если же допускается относительность времени, то оба принципа остаются совместимыми; именно в этом случае исходя из этих двух принципов следует теория, называемая «теорией относительности»»*.

2. Простейшим следствием преобразований Лоренца является *лоренцево сокращение длин* - эффект, который был введен Лоренцем. Поскольку поперечные размеры движущегося тела не изменяются, то в системе отсчета, относительно которой тело движется, его объем сокращается по такому же закону, как и продольный его размер. Вначале высказывалось мнение, что это сокращение является «кажущимся», т.е. связанным только с нашим выбором способа пространственно-временных измерений. Однако Эйнштейн рассмотрел мысленный эксперимент и показал, что лоренцево сокращение - это реальный эффект. Оно *«представляет собой принципиально наблюдаемое взаимное свойство двух движущихся относительно друг друга масштабов»*.

3. Из преобразований Лоренца вытекает также эффект *замедления времени* в системе отсчета, относительно которой часы движутся. Этот вывод подтвердили на опыте в 1940-1941 гг. американские физики Росси и Холл. Они исследовали μ -мезоны, метастабильные частицы с массой примерно в 200 раз большей массы электронов, входящие в состав космических лучей. Среднее время их распада около 2 микросекунд, μ -мезоны порождаются на высотах около 10 км от поверхности Земли. Если бы они двигались даже со скоростью света, то за время своего существования они прошли бы расстояние не более 1 км. Однако они регистрируются на поверхности Земли. В собственной системе отсчета мезонов движущаяся относительно них толща земной атмосферы (около 10 км) сокращается примерно до 1 км. Это расстояние по «своим часам» мезоны проходят за $2,15 \cdot 10^{-6}$ с. Сейчас имеются и другие экспериментальные подтверждения замедления хода времени.

Эффект замедления времени приводит к так называемому *парадоксу близнецов*. Длительные обсуждения его привели к пониманию того, что этот «парадокс» связан с тем, что при повороте системы для движения в обратном направлении система отсчета становится неинерциальной. В этом случае формулы частной теории относительности оказываются неприменимыми.

4. Следствием преобразований Лоренца является также релятивистская теорема сложения скоростей. Скорость результирующего движения отличается от простой алгебраической суммы скоростей частицы и системы отсчета, при этом скорость света оказывается предельной. Если же скорость частицы мала по сравнению со скоростью

света, то справедлив закон сложения скоростей Галилея. С теоретико-групповой точки зрения теоремы сложения скоростей представляют собой законы композиции группы Лоренца или группы Галилея. В общем, в нерелятивистском пределе формулы релятивистской теории переходят в формулы классической механики. Надо отметить, что в первой своей работе по теории относительности - «*К электродинамике движущихся сред*» - Эйнштейн не утверждал, что скорость света в пустоте предельна и что ее превышение невозможно. Этот вопрос он обсуждал позднее, в 1907 г. в связи с теоремой сложения скоростей. Эйнштейн пришел к выводу: «*Этот результат показывает, что мы вынуждены считать возможным механизм передачи сигнала, при использовании которого достигаемое действие предшествует причине. Хотя этот результат с чисто логической точки зрения и не содержит, по-моему, в себе никаких противоречий, он все же настолько противоречит характеру всего нашего опыта, что невозможность $V > c$ представляется в достаточной степени доказанной*».

В наше время обычно на вопрос - возможна ли скорость, превышающая скорость света, отвечают, что невозможна скорость, большая скорости света в вакууме, но вполне возможна скорость, превышающая скорость света в преломляющей среде в оптической области частот. При этом имеется в виду, конечно, эффект Вавилова-Черенкова. Однако мысль Эйнштейна была совсем другая. Он утверждал только, что невозможно *распространение сигнала* со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Если же скорость не связана с передачей сигнала (информации), то в этом случае теория относительности не накладывает никаких ограничений. Более того, такие скорости встречаются постоянно.

Например, пусть в вакууме из некоторой точки, достаточно удаленной от прямой АВ, испускается короткий световой импульс. Этот импульс достигает сначала точки А, а затем побегит от А к В со скоростью $V = c \cos \rho$. Таким образом, скорость распространения импульса оказывается больше c , и тем больше, чем ближе угол ρ к $\pi/2$, т.е. при нормальном падении света. В последнем случае скорость V становится бесконечно большой, и свет приходит в точки А и В одновременно. То, что скорость V превышает скорость света в пустоте, никак не противоречит теории относительности. Дело в том, что световой импульс, приходящий в точку В, никакой информации о точке А не несет, и он не может рассматриваться как сигнал, идущий из точки А. Световой сигнал придет в точку В, даже если точка А не существует. Имеются и другие примеры сверхсветовых явлений (И.М. Франк. УФН 129(4), с. 685, 1977; Б.М. Болотовский, А.В. Серов. УФН 175(9), с.943, 2005).

ИСТОРИЯ ТЕПЛОТЫ

Истоки представлений о теплоте

Представления об огне и свете отражались еще в древнейших сказаниях Востока. С античных времен считалось, что огонь - особый элемент, одна из «стихий» природы. Развивая представления об огне, Платон исходил из того, что имеются разные виды огня – существуют *«материя пламени»*, *«материя света»*, *«материя тепла»*. Материю тепла называли *теплородом*. В течение многих столетий идея о теплороде использовалась в разных вариантах. Она была основой представлений о тепловых явлениях.

В 1620г. Фрэнсис Бэкон в трактате *«Новый органон»* впервые высказал гипотезу о том, что тепло есть состояние движения внутренних частей тел. Аналогичных взглядов придерживался Роберт Бойль, который в 1675 г. впервые продемонстрировал превращение упорядоченного движения в беспорядочное, тепловое. Бэкон и Бойль рассматривали теплоту как проявление движения мелких частиц, из которых состоит тело. Так они заложили основы кинетических представлений. (греческое слово *«кинетикос»* — *«приводящий в движение»*). В дальнейшем кинетические воззрения на теплоту развивали Роберт Гук, Иоганн и Даниил Бернулли и др. Швейцарский ученый Даниил Бернулли (1700-1782) в работе *«Гидродинамика»*, изданной в 1738 г. рассматривал газ как совокупность большого количества мельчайших частиц, которые движутся *«чрезвычайно быстро в различных направлениях и обладают тяжестью»*. Теплоту он связывал с движением этих частиц, поскольку *«известно, что когда повсюду возрастает внутреннее движение частиц, то теплота увеличивается»*. Давление газа на стенки он считал результатом совокупного действия этих частиц. Аналогичные мысли высказывал М.В.Ломоносов. Он считал, что в природе существует два вида *«нечувствительных частиц»* материи: *«элементы»*, т.е. атомы, и *«корпускулы»*, т.е. молекулы. Он полагал, что *«элемент есть часть тела, не состоящая из каких-либо других меньших и отличных между собой тел»*, а *«корпускула есть собрание элементов в одну небольшую массу»*. В своей диссертации *«Размышления о причине тепла и холода»* (1744) Ломоносов видел причину тепла и холода *«во взаимном движении нечувствительных физических частичек»*. Он пришел к выводу, что *«причина теплоты состоит во внутреннем вращательном движении»*, при этом *«частички горячих тел должны вращаться быстрее, более холодных - медленнее»*. Он же сформулировал в 1748 г. положение, что материя и движение не уничтожимы и не сотворимы.

Представления о том, что теплота связана с движением мельчайших частиц вещества, были распространены в ученом мире в XVII в. и первой половине XVIII в. Леонард Эйлер, получивший премию за лучшую работу о природе тепла, писал в 1752

г. «То, что теплота заключается в некотором движении малых частиц тела, теперь уже достаточно ясно». Но во второй половине XVIII в. вновь стала преобладать материальная, или субстанциальная теория теплоты. Эта теория постулировала существование флюида специального рода - *теплорода*, ответственного за тепловые явления. В теории теплорода одним из основных понятий было *количество теплоты*, которое по существу не требовало определения. Этот термин перешел в современную физику, хотя представления о теплоте совершенно отвергают идею о теплороде.

Под теплотой понимают энергию, переданную телу окружающей средой (резервуаром) в результате теплового контакта и полученную телом в таком процессе. Энергия, переданная телу другими способами, есть *работа*. Понятие температуры возникло для характеристики различной степени нагретости тел на основе наших чувственных восприятий. Постепенно количественное определение температуры формировалось на основе объективных физических явлений и фактов, свободных от субъективных ощущений. До XVIII в. не различали понятий количества теплоты и температуры, и не было способов их измерения. Вместе с тем накопленные опытные данные требовали их осмысления и введения соответствующей терминологии, а также количественных характеристик и единиц измерения. Первые шкалы температур возникли в начале XVIII в. В 1724 г. амстердамский коммерсант и любитель-физик Фаренгейт (1686-1736) обозначил температуру смеси льда, поваренной соли и нашатыря числом 32. В качестве второй точки он принял температуру человеческого тела, и обозначил ее числом 98. Впоследствии за вторую точку он принял температуру кипения воды с числом 212. Это - *шкала Фаренгейта*. В 1730г. французский инженер Реомюр (1683-1757) ввел другую шкалу температур. Температуру таяния льда он принял за 0, а температуру кипения воды - за 80. Термометры Реомюра вначале заполнялись спиртом, который впоследствии был заменен ртутью. В 1742 г. шведский астроном и физик Цельсий (1701-1744) приписал температуре таяния льда 100°, а температуре кипения воды 0°. В дальнейшем шкала Цельсия была перевернута, и в таком виде она широко используется и в настоящее время. В 1848 г. лорд Кельвин ввел абсолютную термодинамическую шкалу температуры (*шкалу Кельвина*). Она связана со шкалой Цельсия соотношением: $T (K) = t^{\circ}C + 273,15$. С 1954 г. в этой шкале в качестве основной фиксированной точки используется *тройная точка воды*, которой приписывается температура, равная 273, 16 K. (Тройная точка воды определяет единственную температуру и единственное давление, при которых сосуществуют вода, лед и водяные пары.) Нуль термодинамической стоградусной шкалы лежит на 0,001 K ниже тройной точки чистой воды, т.е., по определению, абсолютный нуль в стоградусной шкале равен -273, 15° C. В 1968 г. была принята *международная практическая температурная шкала* (МПТШ-68), основанная на одиннадцати температурных точках, которые с достаточной точностью воспроизводятся в экспериментах.

Материальная теория теплоты развивалась в XVIII в., главным образом, в работах шотландского физика и химика Джозефа Блэка (1728-1799). В 1762 г. Блэк

обратил внимание, что при постепенном нагревании льда наблюдается задержка в росте температуры. Он пришел к выводу, что теплота, сочетающаяся с телом, не может обнаруживаться термометром. Это - «*скрытая теплота*», на термометр действует лишь «*свободная теплота*». Он открыл также скрытую теплоту парообразования. Тепловые процессы он объяснял с помощью своеобразных формул:

Лед + Теплород = Вода; Вода + Теплород = Пар.

Блэк ввел также понятие *теплоемкости*. Он впервые указал, что следует различать понятия количества теплоты и температуры. Успех теории Блэка был связан с тем, что с ее помощью можно было проводить количественные измерения тепловых явлений, и получать практические рекомендации для теплотехники. В то время это было особенно необходимо в связи с созданием паровой машины.

Все же механические представления о теплоте не исчезли даже во второй половине XVIII в., хотя они носили, в основном, качественный характер. Особенно наглядными и убедительными были публичные опыты английского физика Бенджамина Румфорда (1753-1814) по рассверливанию тупым сверлом орудийного ствола, помещенного в сосуд с водой. В результате через 2,5 часа работы сверла вода закипала. Румфорд пришел к выводу, что теплота является особым видом движения – движением частиц вещества.

В 1783 г. один из основателей химии Антуан Лавуазье (1743-1794) и Пьер Лаплас в «*Мемуаре о теплоте*» рассмотрели обе конкурирующие теории теплоты. Они впервые отметили, что основу кинетической теории теплоты составляет «*принцип сохранения живых сил*». (Под *живой силой* со времен Лейбница понимали произведение массы частицы на квадрат ее скорости). Однако они не сделали вывода о том, какая из этих теорий предпочтительна.

Наряду с представлениями о теплороде среди химиков XVII-XVIII вв. распространенным было представление о *флогистоне* («*воспламеняемый, горючий*»), который считался «*началом горючести*». По этим представлениям флогистон является составной частью веществ, которую они теряют при горении и обжиге (*Георг Шталь*, 1660-1734). Лавуазье с помощью опытов убедительно доказал ошибочность гипотезы о флогистоне. В конце XVIII - начале XIX в. в борьбу против теплорода включились философы Шеллинг (1775-1854) и Гегель (1770-1831). Они доказывали, что свет и теплота - не различные материи, а различные состояния материи.

Однако ни прямые эксперименты, ни выводы философов не могли еще поколебать устоявшегося учения о теплороде. Большинство физиков того времени разделяли и развивали учение о теплороде в том или ином варианте.

Важный шаг в понимании процессов, происходящих в паровых машинах, на основе представлений о теплороде сделал французский инженер Никола Сади Карно (1796-1832). В 1824г. он выпустил небольшую книжку «*Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу*». В ней Карно рассматривал теплород как аналог воды, а разность температур – как разность уровней воды. И как при падении воды работа измеряется произведением веса воды на разность уровней,

так и в паровой машине работа независимо от природы рабочего вещества измеряется произведением количества теплорода на разность температур. Другими словами, отдача тепловой машины ограничивается значениями температур нагревателя и холодильника. Это значит, что для работы паровой машины холодильник является таким же необходимым элементом, как и котел нагревателя. Из анализа работы паровой машины возникло важное представление о термодинамических циклах. Одним из них был *цикл Карно*, который играет исключительную роль в термодинамике. Карно показал, что коэффициент полезного действия тепловых машин, работающих по предложенному им циклу, не зависит от природы совершающего этот цикл вещества, и сформулировал две теоремы (*теоремы Карно*), которые фактически эквивалентны второму началу термодинамики. При этом Карно особо отмечал, что *«Возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода, но его переходу от горячего тела к холодному, т.е. восстановлению его равновесия»*. Это означает, что он считал справедливым закон сохранения теплорода как материи. Дальнейшее развитие идей Карно и возникшие при этом противоречия привели к построению термодинамики, точнее, к открытию ее *второго начала*.

Всеобщий закон сохранения и превращения энергии

Важным событием в развитии представлений о теплоте стало открытие закона о взаимной превращаемости механической работы и теплоты. Этот закон впервые сформулировал немецкий врач Юлиус Майер (1814-1878) в 1840-1842 гг.

Идея о сохранении и превращении энергии или *«сил»*, как в то время говорили, основывалась на многочисленных экспериментальных фактах, и *«ждала своего часа»*, чтобы быть сформулированной в виде закона. Известно высказывание на этот счет Фарадея в 1840г.:

«Мы имеем много процессов, при которых форма силы может претерпеть такие изменения, что происходит ясное превращение ее в другую. Так, мы можем превратить химическую силу в электрический ток или ток в химическую силу. Прекрасные опыты Зеебека и Пельтье показывают взаимную превращаемость теплоты и электричества, а опыты Эрстеда и мои собственные показывают взаимную превращаемость электричества и магнетизма. Но ни в одном случае... нет чистого сотворения силы, нет производства силы без соответствующего израсходования чего-либо, что питает ее».

Майер в 1840-1841 гг. участвовал в плавании на остров Яву как корабельный врач. Он заметил, что цвет венозной крови матросов в тропиках значительно светлее, чем в северных широтах. Для объяснения изменения цвета венозной крови он предположил, что существует связь между потреблением вещества и образованием тепла. Он установил также, что количество окисляемых продуктов в организме человека растет с увеличением выполняемой им работы. Эти наблюдения привели его к мысли о том, что теплота и механическая работа могут превращаться друг в друга.

Закон сохранения и превращения энергии Майер сформулировал и подробно изложил, вычислив механический эквивалент теплоты, в 1845 г. в работе *«Органическое движение в его связи с обменом веществ»*. Открыв закон сохранения энергии, Майер с необходимостью пришел к выводу о том, что следует отказаться от идеи теплорода. Надо сказать, что долгое время работы Майера и его открытие оставались незамеченными. Честь открытия закона сохранения и превращения энергии приписывали Джоулю, а затем - Гельмгольцу. Лишь в 50-х - 60-х гг. XIX в. был признан приоритет Майера.

Чрезвычайно важными для установления закона сохранения энергии были эксперименты английского физика Джеймса Прескотта Джоуля (1818-1889).

В 1841 г. он открыл закон, получивший впоследствии имя *Джоуля-Ленца*: количество тепла, выделяемого в проводнике при прохождении по нему электрического тока, пропорционально силе тока и сопротивлению проводника. Он исследовал также тепловые явления при сжатии и расширении газа. Теплоту рассматривал как результат движения частиц, составляющих тела. В 1843 г. Джоуль проводил эксперименты, из которых следовало, что теплоту можно получить за счет механической работы и обратно - работу за счет тепла. По результатам экспериментов он определил механический эквивалент теплоты. Он писал: *«Количество тепла, способное увеличить температуру одного фунта воды на один градус Фаренгейта, равно и может быть превращено в механическую силу (энергию), которая в состоянии поднять 838 фунтов на высоту в 1 фут»*. Этим Джоуль дал опытное доказательство закона сохранения и превращения энергии. По современным понятиям 1 ккал эквивалентна 427 кГм работы.

В 1847 г. закон сохранения и превращения энергии независимо сформулировал и математически обосновал Герман Гельмгольц в работе *«О сохранении силы»*. Он отмечал всеобщий характер этого закона, которому подчиняются механические, тепловые, электрические, физиологические и другие процессы. Таким образом, был сделан важный вывод, что все виды движений и взаимодействий энергетически эквивалентны. Другими словами, превращения претерпевают виды движения, а их общая мера - *энергия* - сохраняется. Закон сохранения и превращения энергии воспринимался физиками XIX в. как воплощение единства и упорядоченности природы.

Из энергетической эквивалентности механической работы и теплоты следует, что количество теплоты может измеряться в тех же единицах, что и работа. Однако при господстве теории теплорода количество теплоты измерялось с помощью особой единицы - *калории*. Калория - внесистемная единица. Однако используется *международная килокалория*, которая, по определению, содержит 4,1868 килоджоулей. Тысячную долю этой величины называют *калорией*.

После открытия закона сохранения и превращения энергии стало ясно, что теплота как-то связана с движением мельчайших частиц вещества. Поэтому вновь начал возникать интерес к молекулярно-кинетическим представлениям.

Молекулярно-кинетические представления

В 1848-1851 гг. Джоуль старался доказать, так же как и Ломоносов, что вращательное движение атомов *«...способно объяснить закон Бойля-Мариотта, а также другие явления, представляемые упругими жидкостями»*. Однако вскоре он вместо вращательного движения атомов стал рассматривать их поступательное движение и оценил скорость молекул газа. Оказалось, что эта скорость очень большая. По его оценкам молекулы водорода при комнатной температуре движутся со скоростью около 1800 м/с, т.е. вдвое быстрее артиллерийского снаряда. В 1847 г. английский физик Джон Герапат (1790-1868) в книге *«Математическая физика»* изложил свою кинетическую теорию, построенную на основе гипотезы о движении и столкновениях частиц газа, которые он считал упругими шарами. На основе этой модели он объяснил законы идеальных газов, явление диффузии, распространение звука в газах. В 1856 г. немецкий физик Август Крёниг (1822-1879) в статье *«Основания теории газов»* высказал гипотезу, что газы состоят из атомов, ведущих себя как упругие шарики, которые движутся с определенной скоростью в пустом пространстве. Он считал, что атомы взаимодействуют друг с другом только при столкновениях. Он высказал идею о необходимости применения вероятностных методов для описания газов: *«Путь каждой молекулы настолько неупорядочен, что вычислить его не представляется возможным. Однако, привлекая законы теории вероятностей, можно, тем не менее, вместо полного беспорядка получить полный порядок»*. Он впервые показал, что *«живая сила атомов есть ничто иное, как отсчитанная от абсолютного нуля температура»*, и доказал закон Авогадро. Аналогичные воззрения развивал немецкий физик Рудольф Клаузиус (1822-1888). В 1857 г. он опубликовал статью *«О роде движения, которое мы называем теплотой»*, которая стала началом современного развития кинетической теории газов.

В отличие от Крёнига, Клаузиус считал, что молекулы газа обладают не только поступательным, но также вращательным и колебательным движениями. Скорость всех молекул он считал одинаковой и равной некоторой средней скорости. В 1859г. он ввел понятия средней длины свободного пробега молекул в газе и о сфере действия молекул. Клаузиус показал, что газовые законы могут выполняться при следующих условиях: действительный объем молекул должен быть мал по сравнению со всем объемом газа, время столкновения должно быть мало по сравнению со временем между двумя последовательными соударениями и влияние межмолекулярных сил должно быть пренебрежимо мало. Это - условия идеальности газов. Иначе *«наступают различные отклонения от простых газовых законов, которые тем значительнее, чем меньше молекулярное состояние газа соответствует этим условиям»*.

Дальнейший крупный шаг в развитии молекулярно-кинетической теории связан с именем Максвелла, который продолжил и развил идеи Клаузиуса. Максвелл считал, что в газе должно установиться равновесное состояние, которое характеризуется вполне определенной стационарной функцией распределения частиц по скоростям.

Так он впервые нашел закон, по которому при заданной температуре молекулы газа группируются по скоростям вокруг наиболее вероятной скорости. Это было *максвелловское распределение молекул по скоростям*.

Максвелл считал, что для экспериментальной проверки определения *«средней длины пути частицы между двумя столкновениями»* необходимо исследовать внутреннее трение, как *«наиболее прямой метод разрешения этой проблемы»*. Для коэффициента внутреннего трения он нашел формулу

$$\eta = \rho \bar{l} \bar{v} / 3,$$

ρ - плотность газа, \bar{l} -длина свободного пробега, \bar{v} - средняя скорость частиц.

Поскольку длина свободного пробега $\bar{l} = 1/\rho$, то отсюда следует вывод, *«который заключается в том, что если изложенное здесь толкование трения газов правильно, то коэффициент трения не зависит от плотности»*. Этот вывод показался Максвеллу странным но, проведя лично эксперименты, он убедился в его правильности. Максвелл развил также общую теорию явлений переноса: вязкости, диффузии, теплопроводности. Он впервые пришел к закону о равномерном распределении кинетической энергии по поступательным и вращательным степеням свободы: *«окончательное состояние любого числа движущихся частиц любой формы таково, что средняя живая сила перемещения вдоль каждой их трех осей во всех системах одинакова и равна средней живой силе вращения около каждой их трех. главных осей каждой частицы»*. Позднее, в 1879г. Максвелл ввел термин *«степени свободы»*, а также понятие *«фаза системы»*, как совокупность координат и импульсов системы материальных точек. Максвелл считал, что в исследовании тепловых явлений очень продуктивными являются идеи механики.

В то время некоторые ученые считали, что теория Максвелла ненаучна, спекулятивна, поскольку истинная наука не должна иметь дело с «ненаблюдаемыми» величинами. Его обвиняли также в механицизме, в его якобы слишком большом увлечении средствами классической механики. Однако работы Максвелла стали важным этапом на пути создания новой физической теории – статистической механики в той общей форме, которую ей придал впоследствии Гиббс.

В 1865 г. австрийский физик Лошмидт (1821-1895) оценил размеры молекул газа. Он использовал опытные данные о коэффициенте трения в газообразном воздухе и сопоставил их с подобными данными в жидком воздухе, в котором, как он предположил, молекулы непосредственно соприкасаются друг с другом. По его расчетам «диаметр» молекул воздуха оказался равным 12×10^{-8} см, при этом масса атома водорода составила 10^{-24} грамма. Он вычислил также число молекул в 1 см^3 при нормальных условиях. Это число в 1909 г. Жан Перрен предложил называть *постоянной Лошмидта*: $N_L = 2,68676 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Оценивая вклад Максвелла в развитие физики, Рэлей в 1890 г. говорил: *«Можно не сомневаться, что последующие поколения будут рассматривать как высшее*

достижение в этой области его электромагнитную теорию света, благодаря которой оптика становится разделом электричества. ... лишь немного менее важным, если вообще менее важным, чем его труды по электричеству, было участие Максвелла в развитии динамической теории газов».

Как была создана термодинамика

Фундаментальный закон природы об энергетической эквивалентности и взаимной превращаемости всех видов движений и взаимодействий лег в основу новой теории, которую Рудольф Клаузиус называл *«механической теорией тепла»*, а Уильям Томсон (лорд Кельвин) - *«термодинамикой»*. В этой теории гипотеза о теплороде оказалась совершенно ненужной.

Термин *«термодинамика»* закрепился в науке и используется в настоящее время. Этот термин, состоящий из слов *«термо»* и *«динамика»* не следует понимать как учение о движении теплоты. Термодинамика – это наука о законах теплового движения (*термо*) и его превращениях (*динамика*) в другие виды движения. Термодинамика использует феноменологический метод, в котором не рассматривается внутренняя природа или механизм этих превращений. Микроскопический подход к тепловым явлениям используется в статистической физике, выросшей из молекулярно-кинетических представлений.

Согласно идеям Карно, возникновение движущей силы тепловой машины связано не с действительной тратой теплорода, а лишь с его переходом от более горячего тела к более холодному. С другой стороны, доказательство Джоулем эквивалентности работы и теплоты приводило к выводу, что для совершения работы необходима затрата определенного количества теплоты. Возникшее противоречие попытался разрешить лорд Кельвин. Обсуждая опыты Джоуля и имея в виду идеи Карно, лорд Кельвин писал: *«Эти опыты, кажется, опровергают распространенное мнение о том, что теплота может быть получена только от источника, содержащего ее ранее в заметном и скрытом состоянии»*. Таким образом, он пришел к пониманию того, что возникло противоречие, которое требовало коренного пересмотра сложившихся в то время представлений о теплоте. В 1851 г. лорд Кельвин опубликовал работу *«О динамической теории тепла»*, в которой он сформулировал результат своих исследований:

«Невозможно получить механическое действие от какой-либо массы вещества исключительно за счет охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих тел». Иначе можно было бы полученную при этом работу превратить (например, трением) в тепло и таким образом передать тепло от более холодного тела к более тепловому. Несколько ранее Рудольф Клаузиус в работе *«О движущей силе тепла»* пришел к выводу: *«Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более горячему»*. Эту особенность теплоты отмечал еще Блэк в конце XVIII в., но тогда на это никто не обратил внимания. Термин *«самопроизвольно»*

означает, что никаким способом (с помощью теплопроводности, вязкости, излучения и пр.) никогда теплота не может накапливаться в более теплом теле, за счет более холодного. Позднее Клаузиус уточнил свою формулировку: *«Переход тепла от более холодного к более теплему телу не может совершаться без компенсации»*. Указанные выше формулировки лорда Кельвина и Клаузиуса представляют собой *второе начало термодинамики*, из которого следует невозможность *вечного двигателя второго рода*, т.е. периодически работающей машины, которая производила бы работу только за счет охлаждения теплового резервуара.

Эквивалентность тепловой меры энергии (*калория*) механической (*килограммометр*) рассматривалась в то время как доказательство механической природы теплоты. На этом основании Клаузиус и развивал свою теорию теплоты. В упоминавшейся уже работе *«О движущей силе тепла»* Клаузиус ввел функцию, которую он называл *«эргалом»*. Теперь ее называют *внутренней энергией*. В 1865 г. Клаузиус ввел чрезвычайно важное понятие *энтропии*, означающее *«способность к превращениям» (поворот, превращение)*. Он разъяснял, что энтропия – *«это величина, представляющая собой сумму всех превращений, которые должны были иметь место, дабы привести любое тело или систему тел в их нынешнее состояние»*. Важная особенность энтропии заключается в том, что в замкнутой системе она остается постоянной для обратимых процессов, и может только возрасти в случае необратимых процессов.

В 1848 г. лорд Кельвин ввел *абсолютную шкалу температур*. Эту абсолютную шкалу температур называли *шкалой Кельвина*. Развивая и уточняя идеи Карно, Кельвин установил, что отношение абсолютных температур равно отношению количеств тепла в цикле Карно:

$$T_1/T_2 = Q_1/Q_2,$$

где – T_1 и T_2 абсолютные температуры нагревателя и холодильника, Q_1 – количество тепла, отбираемого у нагревателя, Q_2 – количество тепла, отдаваемого холодильнику.

Отсюда, в частности, следует вывод о недостижимости абсолютного нуля, поскольку иначе пришлось бы совершить бесконечно большую работу, отбирая тепло от одного тела и передавая его другому.

Классическая термодинамика изучает общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии равновесия, а также общие закономерности установления равновесия. Состояние термодинамического равновесия определяется как состояние, в которое рано или поздно приходит система, когда она предоставлена самой себе. Для таких состояний понятие времени несущественно. Термодинамика строится на постулатах – *«началах»*, основанных на экспериментальных данных. За исходное в термодинамике принимается положение о существовании *температуры* как особой функции состояния равновесной системы. Понятие температуры чуждо

классической механике. Положение о существовании температуры называют по предложению английского физика Ральфа Фаулера (1889-1944) **нулевым началом термодинамики**. **Первое начало термодинамики** представляет собой закон сохранения и превращения энергии. Оно выполняет своего рода роль бухгалтера, который следит за строгим соблюдением баланса энергии при ее превращениях. Однако при этом остается неопределенным направление протекания процессов. Роль директора, указывающего вид и направление процессов, происходящих при превращениях энергии, играет **второе начало термодинамики**. В 1906г. немецкий физик Вальтер Нернст (1864—1941) сформулировал теорему о том, что энтропия химически однородного твердого или жидкого тела при абсолютном нуле температуры равна нулю. Эту теорему называют **третьим началом термодинамики**.

Термодинамика изучает макроскопические системы, т.е. материальные объекты, состоящие из большого числа частиц. При этом она не рассматривает микроскопическое строение макросистем. Принимается, что совокупность независимых параметров, описывающих макроскопическую систему, определяет ее состояние. Величины, которые не зависят от предыстории системы, т.е. от пути, по которому система пришла в данное состояние, называются *функциями состояния*. Согласно первому началу функцией состояния является *внутренняя энергия* системы, а по второму началу - *энтропия* - функция состояния. Вместе с тем, двум основным понятиям - работе и теплоте, в общем, не соответствуют функции состояния. Понятие работы пришло из механики с тем же смыслом. Работа зависит от формы пути, по которому система переходит из начального состояния в конечное. Понятие «*количество теплоты*» перешло из учения о теплороде. Эта величина также не является функцией состояния, поскольку количество тепла, передаваемого телу, или отбираемого от него, зависит от способа подвода или отвода. Например, при нагревании одной и той же массы тела на 1° при постоянном давлении или постоянном объеме необходимо подводить разное количество калорий. Иногда используется термин «*тепловая энергия*», который ни в коем случае не имеет смысла количества тепла, полученного телом при теплообмене. При правильном понимании - это внутренняя энергия тела.

Термодинамика использует феноменологические методы исследования, основными из которых являются *метод циклов* и *метод термодинамических потенциалов*. Среди различных циклов в термодинамике большую роль играет цикл Карно, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. С помощью цикла Карно были установлены общие термодинамические законы и получен ряд конкретных результатов. В частности, КПД цикла Карно является максимальным по сравнению со всеми другими циклами в тех же температурных пределах.

Метод термодинамических потенциалов (или метод характеристических функций) развил Гиббс. За исходное в этом методе принимается основное уравнение термодинамики:

$$TdS = dU + \Sigma A_i da_i$$

С помощью этого уравнения для простых и сложных систем и систем с переменным числом частиц в разных условиях вводятся соответствующие функции состояния, которые называются *термодинамическими потенциалами*.

ТЕРМОДИНАМИКА

Абсолютно чёрное тело — физическая идеализация, применяемая в термодинамике, тело, поглощающее всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах и ничего не отражающее. Несмотря на название, абсолютно чёрное тело само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой.

Важность абсолютно чёрного тела в вопросе о спектре теплового излучения любых (серых и цветных) тел вообще, кроме того, что оно представляет собой наиболее простой нетривиальный случай, состоит ещё и в том, что вопрос о спектре равновесного теплового излучения тел любого цвета и коэффициента отражения сводится методами классической термодинамики к вопросу об излучении абсолютно чёрного (и исторически это было уже сделано к концу XIX века, когда проблема излучения абсолютно чёрного тела вышла на первый план).

Наиболее чёрные реальные вещества, например, сажа, поглощают до 99 % падающего излучения (то есть имеют альбедо, равное 0,01) в видимом диапазоне длин волн, однако инфракрасное излучение поглощается ими значительно хуже. Среди тел Солнечной системы свойствами абсолютно чёрного тела в наибольшей степени обладает Солнце.

Термин был введён Густавом Кирхгофом в 1862 году.

Закон Стефана — Больцмана — закон излучения абсолютно чёрного тела. Определяет зависимость мощности излучения абсолютно чёрного тела от его температуры. Формулировка закона: Мощность излучения абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна площади поверхности и четвёртой степени температуры тела.

Закон излучения Кирхгофа — физический закон, установленный немецким физиком Кирхгофом в 1859 году. В современной формулировке закон звучит следующим образом:

Отношение излучательной способности любого тела к его поглотительной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной частоты и не зависит от их формы и химической природы.

Закон смещения Вина даёт зависимость длины волны, на которой поток излучения энергии чёрного тела достигает своего максимума, от температуры чёрного тела. С возрастанием температуры максимум излучения сдвигается в ультрафиолетовую часть спектра – коротковолновую.

Тепловое излучение или лучеиспускание — передача энергии от одних тел к другим в виде электромагнитных волн за счёт их тепловой энергии. Тепловое излучение в основном приходится на инфракрасный участок спектра, т.е. на длины волн от 0,74 мкм до 1000 мкм. Отличительной особенностью лучистого теплообмена

является то, что он может осуществляться между телами, находящимися не только в какой-либо среде, но и вакууме.

Примером теплового излучения является свет от лампы накаливания.

Мощность теплового излучения объекта, удовлетворяющего критериям абсолютно чёрного тела, описывается законом Стефана — Больцмана.

Отношение излучательной и поглощательной способностей тел описывается законом излучения Кирхгофа.

Тепловое излучение является одним из трёх элементарных видов переноса тепловой энергии (помимо теплопроводности и конвекции).

Равновесное излучение — тепловое излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с веществом. Основные свойства теплового излучения:

- Тепловое излучение происходит по всему спектру частот от нуля до бесконечности

- Интенсивность теплового излучения неравномерна по частотам и имеет явно выраженный максимум при определенной частоте

- С ростом температуры общая интенсивность теплового излучения возрастает

- С ростом температуры максимум излучения смещается в сторону больших частот (меньших длин волн)

- Тепловое излучение характерно для тел независимо от их агрегатного состояния

- Отличительным свойством теплового излучения является равновесный характер излучения. Это значит, что если мы поместим тело в термоизолированный сосуд, то количество поглощаемой энергии всегда будет равно количеству испускаемой энергии.

Интерпретация второго начала термодинамики

Критерий, определяющий возможность протекания обратимых (несамопроизвольных) процессов и одновременно отражающий одностороннюю направленность необратимых (самопроизвольных) процессов независимо от их конкретной природы устанавливает *второй закон* термодинамики. В соответствии со вторым законом состояние системы может быть описано специальной функцией состояния, называемой *энтропией* – S . Под энтропией понимают отношение теплоты, полученной в ходе обратимого процесса, протекающего при постоянной температуре, к температуре

$$\frac{Q_{\text{обр}}}{T}.$$

Поскольку энтропия является функцией состояния, то ее величина не зависит от способа проведения обратимого процесса при фиксированности начального и конечного состояния:

$$\Delta S = S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}} = \frac{Q_{\text{обр}}}{T}.$$

Эмпирически установленный закон природы гласит, что в обычных условиях тепло самопроизвольно переходит от более нагретого тела к менее нагретому. Из этого закона следует, что для любого превращения, протекающего самопроизвольно, должно выполняться уравнение:

$$(Q/T)_{\text{сист}} + (Q'/T)_{\text{среды}} = \text{Положительная величина.}$$

Это означает, что для изолированной системы с учетом всех происходящих в ней изменений справедливо выражение

$$\Delta S \geq 0.$$

Именно это выражение является критерием направленности процессов в изолированных системах. Если система находится в состоянии равновесия, то ее энтропия остается неизменной. В случае протекания в изолированной системе самопроизвольного процесса, энтропия системы увеличивается до максимального значения, которое будет достигнуто при окончании процесса и установлении термодинамического равновесия.

Первый закон термодинамики утверждает, что энергия может переходить из одной формы в другую, не накладывая при этом ограничений на переход. Второй же закон вводит определенное ограничение, указывая, что не все формы энергии эквивалентны, поскольку возможность превращения одной формы энергии в другую зависит от соотношения между энтропиями соответствующих двух состояний. Установлено, что все существующие формы энергии имеют вполне определенные значения энтропии. Величина энтропии зависит от степени «неупорядоченности» данной формы энергии.

Имеется несколько словесных формулировок второго закона термодинамики.

1. К.п.д., большие чем в обратимом двигателе Карно, недостижимы; к.п.д. двигателя Карно является предельной величиной.

2. Вечный двигатель второго рода, т.е. машина, которая изотермически превращала бы тепло в работу, невозможен. (Первый закон не запрещает такой процесс).

3. Тепло не может самопроизвольно переходить от менее нагретых тел к более нагретым без затраты работы над системой. Этот принцип был сформулирован еще Клаузиусом, его постулаты позднее стали называть первым и

вторым законом термодинамики. Вот эти постулаты: «Энергия мира не изменяется. Энтропия мира стремится к максимуму».

Понимание природы второго закона термодинамики наступило не сразу. Вначале, что было естественно, его стали пытаться обосновать, как и первый закон, на основе чистой механики. Ранкин в 1865 г. и Больцман в 1866 г. пытались вывести второе начало из принципов механики и даже вели спор о приоритете в этих исследованиях. Максвелл первый понял статистическую природу второго начала. Он в 1877 отмечал, что второе начало применимо только к системе, состоящей из большого числа молекул. Он исходил из того, что для определения состояний сложных материальных систем существуют два различных метода. По «строгому динамическому методу» можно проследить за каждой отдельной частицей на всем ее пути и строго пользоваться законами механики. Однако *«применение этого метода к системам, состоящим из большого числа тел, исключено. Поэтому мы используем другой метод, который можно назвать статистическим на основе его аналогии с методами, применяемыми при рассмотрении флуктуации народонаселения»*. Основываясь на этих идеях, Максвелл считал, что невозможно *«вывести второе начало термодинамики из динамических принципов...»*, и что *«истинность второго начала»* соответствует высокой вероятности, а не *«абсолютной достоверности»*. Обсуждая смысл второго начала в книге *«Теория теплоты»*, изданной в 1871 г., Максвелл привел парадоксальный пример. Он предложил вообразить себе некоторое миниатюрное существо, *«способности которого настолько изощрены, что оно может следить за каждой молекулой на ее пути и в состоянии делать то, что в настоящее время для нас невозможно... Предположим, что имеется сосуд, разделенный на две части А и В перегородкой с небольшим отверстием, и что существо, которое может видеть отдельные молекулы, открывает и закрывает это отверстие так, чтобы дать возможность только более быстрым молекулам перейти из А в В и только более медленным перейти из В в А. Это существо, таким образом, без затраты работы повысит температуру в В и понизит в А, вопреки второму началу термодинамики»*. Воображаемое существо в примере Максвелла лорд Кельвин метко окрестил «демоном Максвелла». Максвелл этим примером хотел *«показать, что второе начало термодинамики обладает лишь статистической достоверностью»*.

После безуспешных попыток вывести второе начало из принципов механики Больцман в 1872г. нашел принципиальный путь в работе *«Дальнейшие исследования теплового равновесия молекул газа»*. Он доказал, что существует такая величина - функция H , которая никогда не может возрасти под влиянием движения атомов и эта величина совпадает с точностью до постоянного коэффициента с величиной $\int dQ/T$.

Это знаменитая H -теорема Больцмана: $\frac{dH}{dt} \leq 0$. Больцман показал, что минимальному значению H -функции соответствует максвелловское распределение молекул по скоростям. Он подчеркивал, что совокупность молекул, находящихся в тепловом

движении, подчиняются не тем законам, которые справедливы для описания отдельных частиц, а другим, статистическим закономерностям.

Таким образом, Больцман вслед за Максвеллом рассматривал кинетические, тепловые явления на основе статистических закономерностей. Связав H -функцию с энтропией, Больцман тем самым, по словам Лоренца *«вышел за пределы классической термодинамики. Последняя может определить энтропию только для систем, находящихся в неизменном состоянии, а также для систем, состоящих из различных фаз, каждая из которых, рассматриваемая отдельно, находится в стационарном состоянии, хотя они могут и не находиться в равновесии друг с другом. Если определить величину $-H$ как энтропию, то со словом энтропия будет соединяться ясное понятие и тогда, когда внутреннее состояние газа нестационарно. Здесь снова обнаруживается превосходство атомистики над феноменологической теорией, как можно назвать термодинамику»*.

H -теорема Больцмана вызвала в свое время возражения, известные как *парадокс обратимости* Лошмидта и *парадокс периодичности* Пуанкаре-Цермело. В 1876 г. Лошмидт указал, что микроскопическая обратимость во времени уравнений движения отдельных молекул противоречит одностороннему протеканию явлений в макроскопических системах. Говорят, что на это возражение Больцман отреагировал так: *«Ступайте, поверните их!»* В современном понимании парадокс обратимости разрешается следующим образом. Состояние газовой системы, полученное из его естественного состояния с помощью обращения знаков скоростей всех молекул на противоположные, является чрезвычайно маловероятным и практически в природе не реализуется.

Парадокс периодичности, указанный Цермело в 1896 г., состоял в том, что изолированная динамическая система с ограниченной энергией и конечными размерами за достаточно большой промежуток времени вернется в состояние, сколь угодно близкое к исходному состоянию. Этот промежуток времени называют *временем возврата*, или *периодом цикла Пуанкаре*. Говорят, что на это возражение Больцман ответил: *«Долго же вам придется ждать»*. Дело в том, что это время возврата для газа, находящегося в объеме умеренных размеров, чудовищно велико. Оно превышает возраст Вселенной, оцениваемой как 10^{10} лет! Иными словами, *такое событие не будет наблюдаться никогда*.

Парадоксы Лошмидта и Цермело имели принципиальное значение для понимания природы необратимых процессов и состояния равновесия. Возрастание энтропии по Больцману является результатом перехода системы из менее вероятных состояний в более вероятные. При этом состояние равновесия оказывается наиболее вероятным состоянием. Наблюдаемая необратимость макроскопических процессов представляется как статистический результат огромного числа обратимых микропроцессов: число микропроцессов, протекающих в одном направлении, подавляюще велико по сравнению с числом микропроцессов, протекающих в обратном направлении. Поэтому необратимые процессы можно рассматривать как

наиболее вероятные процессы. Так что *H*-теорема описывает наиболее вероятное поведение системы и ничего не говорит о менее вероятных ситуациях.

Вероятностный смысл возрастания энтропии базируется на знаменитой формуле $S = k \ln W$, где k - постоянная Больцмана, W - термодинамическая вероятность.

Эта формула, выражающая *принцип Больцмана*, высечена на могиле великого Больцмана на Венском кладбище, хотя сам он эту формулу не писал. Он говорил только о пропорциональности между энтропией и логарифмом вероятности термодинамического состояния. Такую формулу написал Планк, он же ввел и постоянную Больцмана. Термодинамическая вероятность W определяется по правилам комбинаторики. Например, в случае идеального газа, состоящего из N молекул, заключенных в данный объем V , и имеющего полную энергию U , расчет проводится так. Если каждая молекула имеет f степеней свободы, то размерность фазового пространства равна Nf . Фазовое пространство делится на конечное, хотя и очень большое число ячеек M : 1, 2, 3, ..., k , ..., M . Допустим, что молекулы совершенно произвольно распределены по этим ячейкам, так что числа заполнения этих ячеек равны $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k, \dots, n_M$. При этом полное число молекул $N = \sum_k n_k$. Каждое распределение чисел n_k характеризует определенное микросостояние газа. Число различных распределений из N молекул по M ячейкам, соответствующих одному и тому же микросостоянию газа, и называют термодинамической вероятностью:

$$W = \frac{N!}{n_1! n_2! \dots!}$$

Согласно принципу Больцмана энтропия имеет смысл меры молекулярного хаоса, а закон возрастания энтропии отражает возрастание дезорганизации (беспорядка) в системе. Современные исследования этого вопроса основываются на том, что вследствие динамической неустойчивости (хаоса) движения атомов в газе происходит перемешивание. Таким образом может быть понят переход от обратимых уравнений механики Гамильтона к необратимому кинетическому уравнению Больцмана (Ю.Л. Климонтович. Турбулентное движение и структура хаоса. - М.: Наука, 1990).

Вероятностное определение энтропии тесно связано с понятием *информации*, которое ввел американский математик Шеннон (1916-2001). Информация I определяется как величина, пропорциональная логарифму числа событий \hat{W} с одинаковыми априорными вероятностями, из которых производится выбор: $I = \log_2 \hat{W}$. Определения информации и энтропии совпадают с точностью до знака. Это не только внешнее сходство. Можно сказать, что энтропия является мерой информативности описания состояний системы. Чем меньше энтропия, тем больше информации содержит описание системы.

Вернемся к демону Максвелла. В этом парадоксе тепло перетекает от более холодной части системы к более теплой. Суть парадокса разъяснил Бриллюэн. Он показал, что главный вопрос здесь заключается в том, как демон может получить

информацию о молекулах. Чтобы увидеть молекулы, он должен их осветить. Для этого ему нужен прибор, например, фонарик, с помощью которого можно получить кванты света с энергией, превышающей энергию равновесных фотонов. Из расчетов следует, что энтропия системы, включающей в себя идеальный прибор для получения информации о молекулах, возрастает. В целом оказывается справедливым второй закон термодинамики в обобщенном виде: $\Delta(s-I) \geq 0$: за получение информации необходимо расплачиваться повышением энтропии.

«Тепловая смерть» Вселенной

Термодинамика, изучающая тепловые явления в системах, состоящих из большого числа частиц, неприменима к микросистемам, размеры которых сравнимы с размерами молекул. Это определяет нижнюю границу применимости термодинамики. Возможно, существуют ограничения и на применимость термодинамики к системам космических размеров, особенно к Вселенной в целом. Этим можно объяснить возникновение концепции «тепловой смерти» Вселенной, которую выдвинули Кельвин и Клаузиус.

Распространяя законы термодинамики на всю Вселенную, Клаузиус сформулировал в кратком виде эту концепцию: *«Энергия мира остается постоянной, энтропия мира стремится к максимуму»*. Другими словами, Вселенная когда-нибудь придет в состояние термодинамического равновесия. Тогда все процессы прекратятся, и не будет никаких причин для возникновения каких-либо процессов: наступит *«тепловая смерть»*. Об этом образно писал английский физик Джеймс Джинс (1877-1946): *«Вселенная не может существовать вечно; рано или поздно должно наступить время, когда ее последний эрг энергии достигнет наивысшей ступени на лестнице падающей полезности, и в этот момент активная жизнь Вселенной должна будет прекратиться»*.

Возражая против концепции «тепловой смерти», Больцман развивал *«флуктуационную гипотезу»*. Он считал, что состояние термодинамического равновесия представляет собой лишь наиболее вероятное, часто встречающееся состояние. Однако в равновесной системе всегда существуют флуктуации, которые могут быть очень большими. Применяя эти соображения, Больцман пришел к выводу, что та часть Вселенной, в которой мы существуем, является огромной флуктуацией Вселенной в целом, находящейся в состоянии термодинамического равновесия. Всякая флуктуация должна со временем исчезать, но столь же неизбежно должны возникать флуктуации в других частях Вселенной. Так что, согласно Больцману, одни миры возникают, другие погибают, но Вселенная в целом не перестает существовать.

Однако гипотеза Больцмана также не безупречна. Дело в том, что вероятность больших флуктуаций в макросистемах, в общем, ничтожно мала. Кроме того, Вселенная в целом является специфической системой, в которой определяющую роль играют дальнедействующие гравитационные силы. Специфика проявляется в том, что,

если для идеального газа наиболее вероятным является равномерное распределение частиц в пространстве, то в системе гравитирующих частиц их однородное распределение не соответствует максимальной энтропии. Звезды и галактики образуются из равномерного распределения вещества не из-за флуктуации, а вследствие естественных процессов, идущих с ростом энтропии. Согласно современным результатам наблюдений Метагалактика является расширяющейся, т.е. нестационарной системой. Поэтому вопрос о «тепловой смерти» Вселенной нельзя считать корректно поставленным.

Тепловое излучение

Еще в древние времена люди знали, что свет и тепло связаны друг с другом. Всякое тело при нагревании начинает светиться – вначале красным цветом, затем синим, фиолетовым.

Тепловое излучение или лучеиспускание – передача энергии от одних тел к другим в виде электромагнитных волн за счёт их тепловой энергии. Понятие теплового излучения было установлено химиком Карлом Вильгельмом Шееле (1742-1786); первые эксперименты произвел Марк Огюст Пикте (1752-1825). Было установлено, что сообщенное телу количество тепла представляет собой разность, между теплом, которое оно получает от среды, и тем, которое оно излучает. В течение первой половины 19 века знали только единый спектр, при этом тепловое и световое излучение часто спутывали. В это время уже были установлены первое и второе начало термодинамики. Термодинамика и оптика развились широко и глубоко; их объединение стало только делом времени. Это объединение совершило величайшую революцию в физике – возникло представление о квантах, имевшее далеко идущие последствия для всей физики и естествознания в целом.

Первый шаг в этом направлении был сделан в 1859г. немецким физиком Густавом Кирхгофом – он открыл важный закон, который сыграл большую роль в развитии представлений об излучении нагретых тел. Используя общие законы термодинамики, Кирхгоф показал, что в состоянии теплового равновесия, независимо от вещества и устройства тела (прибора), отношение излучательной способности нагретого тела к его поглотительной способности является универсальной функцией. Эта функция, которую называют *функцией Кирхгофа* $K(\nu, T)$ определяется только частотой излучения ν и абсолютной температурой T . В современной формулировке закон звучит следующим образом: Отношение излучательной способности любого тела к его поглотительной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной частоты и не зависит от их формы и химической природы. Вывод закона Кирхгофа основывался на твердо установленных общих принципах термодинамики, в частности, на невозможности «*перпетуум мобиле второго рода*», т.е. невозможности получения энергии за счет перехода тепла от холодного тела к горячему. Как и законы термодинамики, закон Кирхгофа имеет общий характер. После

установления этого закона возникла проблема нахождения функции Кирхгофа, или связанной с ней функции, которую сейчас называют *спектральной плотностью излучения*. Она имеет смысл плотности энергии излучения, приходящейся на единичный интервал частоты. Если просуммировать величину *плотности излучения по всем частотам*, характеризующим излучение, то получится плотность энергии излучения, т.е. энергия излучения в единице объема.

Излучательная способность максимальна у тех тел, которые поглощают всю падающую на них энергию. Такие тела Кирхгоф в 1860 г. назвал *абсолютно черными*. Практически черное тело можно изготовить в виде полости с непроницаемыми равномерно нагретыми стенками. Некоторым подобием такого типа ловушки для излучения является комната с одним окном, особенно зеркальным: если смотреть в комнату через окно, то комната кажется темной, потому что свет, проникающий через окно, почти целиком поглощается стенками и отражается стеклом и лишь небольшая его часть выходит снова наружу. Внутри полости в результате многократных испусканий и поглощений излучения при данной температуре устанавливается тепловое равновесие. Измерить спектральную плотность излучения оказалось довольно трудно. Одним из первых такие измерения проводил американский физик Ленгли (1834-1906), который для этой цели изобрел специальный прибор - *болометр*. В 1886 г. он получил данные о распределении энергии в спектре теплового излучения зачерненных сажей источников в далекой инфракрасной области.

Второй шаг был сделан Людвигом Эдуардом Больцманом (1844-1906). В 1884г. он на основании электромагнитной теории света путем простого применения обычных термодинамических способов он показал, что мощность излучения абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна площади поверхности и четвёртой степени температуры тела. Коэффициент пропорциональности в соответствующем уравнении есть универсальная постоянная. Фактически он обосновал и уточнил результат, полученный еще в 1879 г. Джозефом Стефаном (1835-1893). Закон Стефана-Больцмана – триумф электромагнитной теории света.

Данный закон говорит только о суммарной энергии всего спектра. Целью дальнейших исследований стало изучение распределения энергии в спектре, т.е. поиск связи между энергией теплового излучения и длиной волны и температуры.

Третий шаг в теории теплового излучения сделал в 1893 г. немецкий физик Вильгельм Вин (1864-1928). Он установил, что кривая распределения спектральной плотности излучения черного тела должна иметь максимум. Длина волны, соответствующая этому максимуму, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$\lambda_{max}T = Const = 0,2898 \text{ см}\cdot\text{град}.$$

Так был открыт *закон смещения Вина*. Данный закон объясняет, почему при возрастании температуры максимум интенсивности в спектре все больше смещается к

коротким волнам. Стало понятным, почему тепловое излучение при более низких температурах остается невидимым, а при температуре около 6000° максимум интенсивности становится видимым. Кроме того, зная положение максимума можно вычислить температуру источника излучения, например Солнца. Далее в 1896г. используя гипотезу российского физика Владимира Александровича Михельсона (1860-1927) о том, что распределение энергии излучения по частотам аналогично распределению молекул газа по скоростям, он предложил эмпирическую формулу. Она определяла спектральную плотность излучения в явном виде и в нее входили постоянные a и b , *которые* следовало определять с помощью опытных данных. Далее экспериментально было показано, что формула Вина справедлива лишь в области коротких волн (или при достаточно низких температурах).

В 1900 г. лорд Рэлей на основе известного закона кинетической теории о равномерном распределении энергии по степеням свободы получил другую формулу для распределения энергии в спектре абсолютно черного тела:

$$\rho_{\nu} = C\nu^2 T,$$

где C – некоторая величина, не зависящая от температуры.

Вывод этой формулы в дальнейшем уточнил Джинс, поэтому формулу стали называть формулой Рэля-Джинса. Эксперимент показал, что в области длинных волн (или при достаточно высоких температурах) спектральная плотность излучения пропорциональна температуре, что соответствует формуле Рэля-Джинса. Эту формулу вначале пытались применить ко всей области частот (или длин волн), что явно приводило к абсурду. Действительно, суммирование по всем частотам от нуля до бесконечности приводит к тому, что плотность энергии излучения оказывается бесконечно большой, что физически бессмысленно.

Из формулы Рэля-Джинса следует, что большая часть энергии в спектре теплового излучения приходится на коротковолновую, или, как говорят, на ультрафиолетовую часть, что противоречит эксперименту. Возникшее противоречие Пауль Эренфест назвал *«ультрафиолетовой катастрофой»*, или *парадоксом Рэля-Джинса*. В связи с этим патриарх классической физики Хендрик Лоренц отмечал, что *«уравнения классической физики оказались неспособными объяснить, почему угасающая печь не испускает желтых лучей наряду с излучением больших длин волн»*.

Такое положение, когда распределение энергии всего спектра описывается двумя формулами, было не нормальным. Оно свидетельствовало, что фундаментальная закономерность связи между энергией излучения, температурой и длиной волны остается неизвестной. Поэтому поиски универсальной формулы продолжались.

КВАНТОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Возникновение квантовых представлений

Среди многих физиков конца XIX в., пытавшихся найти выражение для спектральной функции ρ_ν (или ρ_λ), которое согласовалось бы с экспериментальными данными, был Макс Карл Эрнст Людвиг Планк. Смысл первого шага Планка был принципиально прост – найти математическую формулу, которая совмещала бы обе предыдущие – Вина и Рэлея-Джинса. Планку впервые удалось получить формулу, объясняющую все свойства теплового излучения черного тела.

Многими годами позже он вспоминал, что знаменитая формула была найдена им в воскресенье, 7 октября 1900 г. По его словам, в этот день к нему в гости пришел его коллега физик-экспериментатор Генрих Рубенс. Во время беседы Рубенс рассказал о недавних экспериментах, из которых следовало, что для коротких длин волн интенсивность излучения достаточно хорошо описывается законом Вина, а для длинных волн интенсивность пропорциональна температуре. В тот же вечер, по свидетельству Планка, он получил интерполяционную формулу для функции ρ_λ которая при малых длинах волн переходила в формулу Вина, а в случае больших длин волн в формулу Рэлея-Джинса. Вот эта формула:

$$\rho_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

Постоянные c_1 и c_2 должны быть определены из сопоставления с опытными данными. Свою формулу Планк представил в докладе «*Об улучшении формулы Вина для спектрального распределения*» на заседании Немецкого физического общества 19 октября 1900 г.

Планк открыл свою формулу путем гениально угаданной интерполяции. Оставалось однако главное дело проблема надлежащего теоретического обоснования этого полуэмпирически найденного закона. Поэтому он вернулся к обнаруженной Больцманом связи между энтропией и вероятностью. По воспоминаниям Планка это было так: поскольку, по Кирхгофу, законы равновесного излучения не зависят от формы и материала полости, то он использовал модель полости, которая состоит из излучающих и поглощающих атомов, представляемых в виде осцилляторов различной частоты, и вычислил вероятность числа колебаний линейного осциллятора. При этом он исходил из неслыханно новой, только по необходимости им введенной идеи о том, что возможны только дискретные ступени энергии. В таком случае действительно получался закон излучения, найденный с помощью интерполяции.

Таким образом, Планк нашел удивительно точную формулу для распределения энергии в спектре черного тела. Однако он понимал, что эта формула является *«лишь счастливо обнаруженной интерполяционной формулой, поэтому, с самого дня ее установления передо мной, - как он писал впоследствии, - возникла задача - отыскать ее подлинный физический смысл, и эта проблема привела меня к рассмотрению связи между энтропией и вероятностью в духе развития идей Больцмана. Именно на этом пути после нескольких недель напряженнейшей в моей жизни работы темнота прояснилась, и передо мной забрезжил свет новых далей»*.

В дальнейшем вместо постоянных c_1 и c_2 Планк ввел новые постоянные \hbar и k . Этот закон удовлетворял закону смещения Вина, если ступени энергии отличались друг от друга на величину $\hbar\lambda$, где \hbar – новая универсальная константа, элементарный квант действия. Таким образом, теоретическая формула излучения становилась тождественной формуле, найденной путем интерполяции. Численное значение \hbar получилось на основании измерений равным $\hbar = 6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг·с, а значение $k = 1,346 \cdot 10^{-16}$ эрг/град.

Планк вычислил также число Лошмидта и заряд электрона, численные значения которых согласовывались с имевшимися в то время данными. Это, конечно, не могло быть случайным и свидетельствовало о справедливости квантовой гипотезы.

При малых частотах излучения (по сравнению с энергией теплового движения) из формулы Планка следует, что спектральная плотность излучения пропорциональна температуре, т.е. полностью соответствует формуле Рэлея-Джинса. В случае высоких частот (малых длин волн) из формулы Планка вытекает формула Вина. Тем самым *«ультрафиолетовая катастрофа»* устраняется. Она, собственно, возникла из-за того, что формулу Рэлея-Джинса неправомерно распространяли на всю область частот излучения. Для любых частот справедлива формула Планка, которая не содержит в себе никакого парадокса и полностью согласуется с экспериментальными данными. Интегральная плотность излучения, вычисленная с помощью формулы Планка, оказывается конечной, в точности соответствует известному в термодинамике закону Стефана-Больцмана.

Итак, Планк показал, что *«элемент энергии»* равен $\varepsilon = \hbar\nu$, т.е. что энергия осциллятора переносится квантами - дискретными порциями $\hbar\nu$. Это был революционный шаг в развитии физики. Как писал Анри Пуанкаре, теория Планка, согласно которой *«...физические явления перестают повиноваться законам, выражаемым дифференциальными уравнениями, есть без всякого сомнения самая большая и самая глубокая революция, которую натуральная философия претерпела со времен Ньютона»*.

Идея о квантах энергии противоречила и механике, и электродинамике, но иного выхода Планк не видел. Сам Планк еще долго пытался с помощью различных гипотез объяснить распространение излучения на основе волновых представлений, и лишь под напором экспериментальных фактов он вынужден был оставить свои попытки. В

1918г. за открытие кванта действия Макс Планку была присуждена Нобелевская премия по физике.

Квантовая идея Планка, как это часто бывает с революционными идеями, не сразу была воспринята его современниками. В этом отношении характерны воспоминания одного из основателей квантовой механики Макса Борна: *«Как же были приняты эти идеи? Я позволю себе говорить о моем собственном опыте. В Геттингене, насколько я припоминаю, я ничего не слышал о квантах; также и в Кембридже, где я весной и летом 1906г. несколько месяцев слушал лекции Дж.Дж. Томсона и Лармора и прошел экспериментальный курс в Кавендишской лаборатории. Только тогда, когда я осенью 1906г. приехал в Бреслау к Люммеру и Прингсхейму, я попал в настоящую квантовую атмосферу. Ибо оба они сделали существенный вклад в экспериментальное изучение черного излучения. Но хотя в центре дискуссии стояла формула Планка, обсуждающие склонны были гипотезу Планка о квантовании энергии осциллятора рассматривать как предварительную рабочую гипотезу, а световые кванты Эйнштейна всерьез не принимали...».*

Анализу логической структуры квантовой теории излучения был посвящен ряд работ Эрнфеста. Он показал, что из классической статистики газо-кинетического ансамбля вытекает только закон Рэлея-Джинса, и, следовательно, закон Планка не совместим с этой статистикой. С другой стороны, российский физик Юрий Александрович Крутков (1890-1952) в 1914 г. показал, что из классической статистики световых квантов следует только формула излучения Вина. Последовательное обоснование закона Планка стало возможным с помощью квантовой статистики Бозе-Эйнштейна, развитой в 1924 г.

Развитие термодинамики

Законы термодинамики универсальны и применимы к макроскопическим системам любой природы - к классическим и квантовым системам, к веществу и полю, в частности, к электромагнитному полю - излучению. Именно развитие термодинамики излучения черного тела привело к открытию **Планком** квантов излучения и затем к построению квантовой теории. Современная термодинамика, обладающая мощным феноменологическим методом исследований, содержит ряд разделов, которые даже не могли себе представить ее создатели. Прежде всего, была разработана **релятивистская термодинамика**, являющаяся основой релятивистской теории гравитации. Развита также **термодинамика систем с отрицательной абсолютной температурой**. Наиболее впечатляющие результаты были получены в новом разделе термодинамики, который выделился в самостоятельную область науки в 50-х гг. XX в. Этот раздел называется **термодинамикой необратимых процессов, или неравновесной термодинамикой**. Далее кратко рассмотрим некоторые положения этой теории.

Начало термодинамики необратимых процессов связывают с работой французского математика и физика Жана Фурье «Аналитическая теория тепла» (1822). В этой работе Фурье показал, что вектор плотности потока тепла определяется градиентом температуры (в современных обозначениях): $\vec{q} = -k\Delta T$, где k - коэффициент теплопроводности. Как уже отмечалось, Ом в 1827 г. вывел закон постоянного тока, используя эти идеи Фурье. В 1855 г. немецкий ученый Фик рассмотрел явление диффузии и нашел, что диффузионный поток определяется градиентом концентрации. Градиенты температуры, концентрации и т.п. получили название *термодинамических сил*. Таким образом, стало ясно, что потоки пропорциональны термодинамическим силам. Идеи о пропорциональности потоков соответствующим градиентам обобщил в 1931 г. американский физико-химик Ларс Онсагер (1903-1976). Он исходил из опытных фактов, которые говорят о том, что наряду с «прямыми» процессами происходят «косые», или побочные процессы. Например, перенос заряда под действием электрического поля, происходящий при движении ионов в электролите или электронов в металле, одновременно связан с переносом их средней кинетической энергии (тепла) и массы (диффузия). И наоборот, перенос массы при наличии градиента плотности или перенос тепла при градиенте температуры в системе заряженных частиц сопровождается одновременно переносом заряда, т.е. электрическим током. На основании этого Онсагер предположил, что при небольших отклонениях от равновесия потоки I_i и термодинамические силы A_j связаны линейными соотношениями: $I_i = \sum_j L_{ij} X_j$.

Эти соотношения по предложению американского физика Эккарта (1940) называются *термодинамическими уравнениями движения*. Величины L_{ij} называются *кинетическими коэффициентами*. Они могут быть любыми функциями параметров состояния (температуры, давления, состава и т.п.), но не зависят от потоков и термодинамических сил. Эти коэффициенты в термодинамике считаются известными из опыта. Они могут быть явно рассчитаны только в рамках кинетической теории. Линейные соотношения между потоками и «силами» справедливы только при небольших градиентах макропараметров. Если же градиенты велики, то необходимо пользоваться нелинейной неравновесной термодинамикой. В этой теории учитываются члены с производными более высоких порядков, или считается, что кинетические коэффициенты зависят от термодинамических сил. Опираясь на *принцип микроскопической обратимости* и на *гипотезу о макроскопическом характере затухания флуктуаций*, Онсагер установил *соотношения взаимности*, отражающие *принцип симметрии* кинетических коэффициентов. Согласно этому принципу матрица кинетических коэффициентов является симметричной, т.е. недиагональные коэффициенты равны: $L_{ij} = L_{ji}$, (при $i \neq j$). Большое значение соотношений взаимности состоит в том, что они связывают различные физические процессы. Например, явление термодиффузии и обратный процесс – диффузионный термоэффект. Так что по известным характеристикам одного процесса можно предсказать характеристики другого процесса, обратного.

Принцип микроскопической обратимости отражает тот факт, что механические уравнения движения инвариантны по отношению к обращению времени (замена времени t на $-t$), т.е. к замене прошлого на будущее. При этом некоторые макропараметры системы (давление, плотность, температура) не меняются при замене знака времени. Макропараметры определяются как средние значения соответствующих микроскопических характеристик отдельных частиц системы. Например, температура связана со средней энергией теплового движения частиц, плотность - со средним числом частиц в единице объема и т.д. Среди микроскопических величин есть такие, которые не меняют своего знака при обращении времени, например, координаты частиц. Таким величинам и соответствуют макропараметры, не изменяющиеся при инверсии времени. Наряду с этим имеются величины, меняющие свой знак, например, скорости частиц. Им соответствуют макропараметры, такие как термодинамические силы, которые меняют свой знак при инверсии времени. Согласно *гипотезе о рассасывании флуктуации* в среднем флуктуации рассасываются (затухают) по обычным макроскопическим законам. В этом состоит *принцип Онсагера*. Например, разность температур можно создать искусственно, но она может возникать и естественно за счет флуктуации. Следует отметить, что хотя соотношения взаимности опираются на особенности молекулярного движения, но сами по себе они не требуют какой-либо молекулярной модели. Поэтому соотношения взаимности имеют универсальный характер.

Особую роль в термодинамике неравновесных процессов играет энтропия и закон возрастания энтропии. В связи с этим бельгийский физик Илья Пригожий (1917-2003), внесший существенный вклад в развитие неравновесной термодинамики, ввел понятие *производства энтропии* за счет необратимых процессов. Эта величина определяется как скорость изменения энтропии: $\sigma = \frac{dS}{dt}$. В состоянии термодинамического равновесия $\sigma = 0$. Указывая на роль второго начала термодинамики, Пригожий в своей Нобелевской лекции в 1977г. говорил: «... хочу обратить Ваше внимание на тот факт, что через 150 лет после того, как второй закон был сформулирован, он все еще представляет собой скорее программу, чем четко очерченную теорию в обычном смысле этого понятия. Действительно, единственное, что второй закон точно говорит о производстве энтропии - знак этой величины. Не определена даже область справедливости неравенства. Это обстоятельство - одна из главных причин того, почему применение термодинамики, по существу, ограничено анализом равновесных процессов».

В термодинамике необратимых процессов принимается, что производство энтропии является комбинацией потоков и термодинамических «сил»: $\sigma = \sum_j I_j X_j$. Согласно второму закону термодинамики для изолированной системы $\sigma \geq 0$. Это неравенство устанавливает, что физическая система, изолированная от внешних воздействий, с течением времени стремится к состоянию равновесия, в котором энтропия максимальна. Однако во многих случаях из-за граничных условий,

наложенных на систему, она не может достичь равновесия. Например, атмосфера Земли, представляющая газ без стенок, не находится в равновесии. Если граничные условия не зависят от времени, когда, например, в системе поддерживается постоянный перепад температуры или разность давлений, то макропеременные этого состояния асимптотически становятся не зависящими от времени. В этом случае говорят, что достигается *стационарное неравновесное состояние*, или просто *стационарное состояние*. Такие состояния следует отличать от *равновесия*, в котором энтропия максимальна, а производство энтропии равно нулю. Стационарные состояния играют важную роль в физике, поскольку подавляющую часть времени системы, находящиеся под постоянным (или почти постоянным) воздействием, проводят именно в стационарном состоянии. Рассмотрим, например, живой организм. Если исключить аномалии в его состоянии, такие как болезнь, сон, нервные потрясения и т.п., то зрелый организм находится в стационарном состоянии с постоянными характеристиками. Стационарные состояния типичны также в физике, например, в гидродинамике, где изучаются течения при постоянном перепаде давления и т.п. Процессы химической технологии также проходят в стационарных условиях.

В общем смысле стационарные состояния можно рассматривать как определенный этап эволюции системы к равновесию. Если система находится в неравновесном состоянии, то вначале формируются квазистационарные неравновесные состояния, а затем эти состояния эволюционируют к полному статистическому равновесию. Термин «квазистационарное» применяется в том смысле, что стационарные состояния существуют в ограниченном промежутке времени. По прошествии этого промежутка система медленно эволюционирует в другие стационарные состояния или к равновесию.

Возникает естественный вопрос: характеризуется ли стационарное состояние экстремальным значением какой-либо величины, как равновесие характеризуется максимумом энтропии? На этот вопрос отвечает **теорема Пригожина**: *в стационарном неравновесном состоянии производство энтропии минимально, т.е.*

$\frac{d\sigma}{dt} \leq 0$. Эта **теорема** отражает внутреннюю устойчивость неравновесных систем. Она указывает, что внутренние неравновесные процессы всегда протекают в таком направлении, чтобы производство энтропии уменьшалось. Поэтому система, находящаяся в состоянии с минимальным производством энтропии, не может сама по себе из него выйти. Если внешнее воздействие выводит систему из состояния с минимальным производством энтропии, то в системе возникают процессы, которые стремятся ослабить результаты этого воздействия. Это отражает принцип Ле-Шателье-Брауна в термодинамике необратимых процессов.

Общим свойством открытых систем, т.е. систем, обменивающихся энергией с окружающей средой, является их *способность к самоорганизации*. Сама неравновесность открытой системы служит источником ее упорядоченности. Для рассмотрения процессов самоорганизации линейная термодинамика необратимых процессов неприменима, поскольку образование структур происходит вдали от

равновесия. Такие состояния достигаются в открытых системах при эволюции системы с помощью изменения потока вещества и энергии извне. В ходе неравновесных процессов при некотором критическом значении внешнего потока из неупорядоченных и хаотических состояний в результате потери их устойчивости могут возникать упорядоченные структуры (И. Пригожин, И. Стенгерс. Порядок из хаоса. -М.: УРСС, 2003).

Простейшим примером возникновения структуры из полностью хаотической фазы являются конвективные ячейки Бенара. В 1900 г. Бенар опубликовал статью с фотографией структуры, по виду напоминающей пчелиные соты. Эта структура образовалась в слое вязкой жидкости, находящейся в плоском широком сосуде, который сильно подогревался снизу, после того, как градиент температуры превышал некоторое критическое значение. Весь слой жидкости распадался на одинаковые вертикальные шестигранные призмы. Рассмотрим механизм образования ячеек Бенара. Возникающий в слое температурный градиент называют инверсным, поскольку жидкость у нижней поверхности из-за теплового расширения имеет меньшую плотность, чем вблизи верхней поверхности. Такое состояние является неустойчивым. В самом деле, из-за наличия силы тяжести и архимедовой выталкивающей силы легкий нижний слой и тяжелый верхний слой стремятся поменяться местами. Однако при небольших градиентах температуры такому перемешиванию препятствует вязкость жидкости и тепло передается только путем теплопроводности. При достижении критического значения градиента температуры возникает конвекционный поток, который увеличивает пропускную способность слоя жидкости, передающего тепло. Для увеличения пропускной способности жидкости необходима строгая регулировка встречных потоков. В результате и возникает структура в виде шестиугольных ячеек, обеспечивающая максимальную скорость теплового потока. Внутри ячеек жидкость поднимается вверх, а по краям опускается вниз. В поверхностном слое жидкость растекается от центра к краям, а в придонном - от границ призм к центру. График потока тепла от нижней поверхности к верхней в зависимости от градиента температур представляет собой ломаную прямую. В докритическом режиме происходит обычный перенос тепла в неподвижной жидкости. В сверхкритическом режиме такой перенос становится неустойчивым, поскольку покоящаяся жидкость не может обеспечить перенос большого количества тепла, и ему на смену приходит другой, устойчивый режим, характеризующийся возникновением конвекционных ячеек. Поскольку система обменивается со средой только теплом и в стационарных условиях получает такое же количество тепла (при температуре T_1), как и отдает (при температуре $T_2 < T_1$), то можно прийти к выводу, что система в этих условиях отдает энтропию среде: $\Delta S = \frac{q}{T_1} - \frac{q}{T_2}$.

Это значит, что внутренняя структура, или самоорганизация, поддерживается за счет поглощения отрицательной энтропии. Отрицательная энтропия по предложению Леона Бриллюэна называется *негэнтропией*.

Условия образования ячеек Бенара в некотором смысле аналогичны условиям, необходимым для существования жизни на Земле. Сфера жизни на Земле, представляющая собой упорядоченную структуру, возможна лишь благодаря негэнтропии солнечного излучения. В самом деле, на Землю приходит энергия излучения от высокотемпературного источника, каким является Солнце ($T_1 = 6000 \text{ K}$), а уходит в космическое пространство при низкой температуре (температура Земли $T_2 = 300 \text{ K}$). Если считать, что в среднем энергия на Земле не накапливается, то поток энтропии от Солнца на Землю меньше потока энтропии от Земли в космическое пространство. В термодинамике необратимых процессов пользуются понятием «качества энергии». Считается, что качество энергии определяется малым потоком энтропии. В этом смысле говорят, что Земля получает высококачественную энергию от Солнца, перерабатывает ее (при этом энтропия возрастает) и затем выбрасывает в космическое пространство вместе с наработанной энтропией. По подсчетам эстонского физика Карла Ребане (1926) негэнтропийный поток Земли составляет около $3 \cdot 10^{24} / T_2$. Это и обеспечивает жизнедеятельность на Земле, так что «тепловая смерть» не грозит. Как писал Пригожий, *«Жизнь более не выглядит как островок сопротивления второму началу термодинамики или как деятельность каких-то демонов Максвелла. Она возникает теперь как следствие общих законов физики с присущей ей специфической кинетикой химических реакций, протекающих в далеких от равновесия условиях. Благодаря этим специальным кинетическим законам потоки энергии и вещества создают флуктуационный и структурный порядок в открытых системах»*.

Явления самоорганизации и эволюции структур свойственны не только физике, но природе в целом. Много примеров образования пространственных, временных и пространственно-временных структур дают химические реакции, биологические объекты и т.п. Общая черта их состоит в том, что в ходе неравновесного процесса из пространственно однородного состояния самопроизвольно образуется какая-то структура. Эти структуры Пригожиу предложил называть *диссипативными структурами*. Ячейки Бенара – одна из таких структур. Грандиозная структура, подобная ячейкам Бенара, имеется и на самом Солнце. Эта структура, представляющая собой сферический слой толщиной около 10^5 км , обеспечивает перенос в атмосферу Солнца энергии, которая высвобождается за счет термоядерных реакций в его недрах. К числу пространственных диссипативных структур относятся также кольца Сатурна.

Область науки, изучающую общие закономерности в процессах образования, устойчивости и разрушения структур в сложных неравновесных системах различной природы, не только физической, называют *синергетикой* (от греч. *совместный, согласованно действующий*) (Г. Хакен. Синергетика. - М.: Мир, 1980; Дж. М. Т. Томпсон. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. - М.: Мир, 1985).

ИСТОРИЯ АТОМА

Среди различных физических идей особую роль играет атомная гипотеза. Это отмечал выдающийся американский физик Ричард Фейнман (1918-1988): *«Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания вдруг оказались бы уничтоженными, и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то, какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это - атомная гипотеза (можете называть ее не гипотезой, а фактом — это ничего не меняет), все тела состоят из атомов - маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому. В одной этой фразе содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения»* (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Т.1, 2. - М.: Мир, 1976, с. 23).

Квантовые понятия и представления возникали под неумолимым напором экспериментальных фактов. Вместе с тем идеи, высказываемые гениальными творцами современной физики, часто опережали эксперимент, и лишь в дальнейшем они получали опытное подтверждение. Эти идеи произвели коренную революцию в физике, и стали основой современной физики, в том числе физики атомов и молекул. Конечно, гениальные идеи не возникали на пустом месте, они подготавливались всем ходом развития физики благодаря открытиям многих ученых. Становление и развитие атомной физики происходило при глубоком переосмыслении классических понятий и представлений и сопровождалось острыми дискуссиями по проблеме причинности в физике, проблеме измерений и роли наблюдателя, по проблемам человеческого познания и т.п.

Более двух тысячелетий атом считался мельчайшей бесструктурной частицей вещества. Лишь великие открытия XIX и XX вв. привели к пониманию того, что атом обладает структурой и состоит из электронов и ядра. Затем оказалось, что и ядро является сложным объектом, состоящим из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны получили общее название - *нуклоны*. Дальнейшее развитие физики показало, однако, что простые представления о том, что ядро состоит из протонов и нейтронов, как из «последних кирпичиков», также неверно. Из экспериментов следует, что *нуклоны* имеют сложную структуру, они строятся из *кварков* и взаимно превращаются друг в друга. Согласно современным представлениям элементарными «кирпичиками» мироздания считаются *лептоны* и *кварки*. Лептонами являются, в частности, электроны. Имеют ли лептоны и кварки структуру, покажет будущее развитие физики.

Современная квантовая теория разрушила, казалось бы, вполне естественные представления о качественной одинаковости макро- и микромира. Вместе с тем она

привела к пониманию их единства и взаимообусловленности. Квантовая теория блестяще объясняет не только свойства мира атомов, но и макроскопические эффекты, например, сверхпроводимость и сверхтекучесть. Более того, оказалось, что без квантовых представлений невозможно объяснить и некоторые мегапроцессы, например, свойства нейтронных звезд - пульсаров. Оказалось также, что межзвездное пространство нашей Галактики содержит газ, состоящий из атомов и молекул, и что существуют межзвездные мазеры и т.п. В последние годы происходит взаимное проникновение физики высоких энергий, изучающей явления на расстояниях порядка $10^{-13} - 10^{-15}$ см, и астрофизики, изучающей свойства Вселенной.

Квантовые понятия и представления кажутся довольно трудными при первом знакомстве с ними, и противоречащими «здравому смыслу», основанному на обыденном опыте. Например, в микромире невозможно одновременно точно определить координату и импульс частицы в некотором направлении; не существуют орбиты - траектории электронов в атоме; все микрочастицы, например электроны, являются тождественными - их нельзя отличить ни по какому признаку - они все абсолютно на одно «лицо» и т.д. Чрезвычайно важным было открытие, что законы сохранения энергии, импульса и момента импульса, справедливые для макропроцессов, выполняются и в микромире. Наряду с этим оказалось, что в микромире существуют свои специфические законы сохранения, например, закон сохранения четности и т.д.

Возникновение представлений об атоме

Слово «атом» в переводе с греческого языка означает «неразрезаемый» или «неделимый». Атомами древние мыслители более двух с половиной тысяч лет назад называли мельчайшие неделимые частички, из которых, по их представлениям, состоит все существующее во Вселенной, в том числе на Земле. Возникновение учения об атомах связывают с именем древнегреческого философа Демокрита. С помощью логических рассуждений Демокрит сделал вывод, что существует предел деления вещества. Предельную неделимую далее частицу он и назвал атомом. Демокриту принадлежат слова: *«Начало Вселенной - атомы и пустота... Атомы бесчисленны по величине и по множеству, носятся же они во Вселенной, кружась в вихре, и таким образом рождается все сложное: огонь, вода, воздух, земля. Дело в том, что последние суть соединения некоторых атомов...»*.

Считают, что идеи атомизма разделял учитель Демокрита Левкипп из Милета. Атомистическое учение Левкиппа-Демокрита в дальнейшем развивал античный мыслитель Эпикур из Самоса, а затем его ученики и последователи. К сожалению, их труды и трактаты не сохранились, как и многие другие произведения древности.

Не надо думать, что атомизм Демокрита-Эпикура был результатом лишь абстрактных умозаключений. Напротив, в основе их учения лежат три принципа, опирающиеся на конкретные наблюдаемые факты. Об этом говорится в одном из

дошедших до нас сочинений древних мыслителей - в поэме древнеримского философа и поэта Тита Лукреция. В поэме Лукреция отмечаются три принципа, лежащих в основе атомного учения Демокрита-Эпикура: сохранение материи, сохранение форм (или видов) материи и существование пустоты. Первый принцип отражен в словах: *«Ничто не способно возникнуть из ничего»*. Второй принцип связан с тем наблюдаемым фактом, что в природе вновь и вновь повторяются одни и те же виды материи: *«На тела основные природа все разлагает и в ничто ничего не приводит»*. Наконец, *«Без пустоты никуда вещам невозможно бы вовсе двигаться было»*. Это подтверждают факты. Например, *«звуки идут через стены домов и замкнутые двери, внутрь пролетая»*, сквозь камни пещер сочится вода и т.д.

В атомном учении Демокрита-Эпикура считается, что все тела состоят из «изначальных» частиц. Если бы они делились бесконечно, как считал Анаксагор (500-428 гг. до н. э.) и другие мыслители, то они ничем бы не отличались от Вселенной.

Атомистическое учение древнегреческих мыслителей содержало следующие основные положения:

1. Вся материя состоит из атомов, которые являются мельчайшими невидимыми частями материи. Эти атомы не могут быть дальше расщеплены на более мелкие части. Демокрит считал, что процессы разделения материи на мелкие части и соединения их в единое целое являются взаимно обратимыми, а если бы материя могла делиться до бесконечности, то ничто не могло бы остановить этот процесс, который привел бы к разрушению всей материи.

2. Между атомами существует пустое пространство. Поскольку материя состоит из атомов, то все изменения являются результатом движения атомов. Однако движение атомов было бы невозможно, если бы между ними не было пустого пространства.

3. Атомы должны быть совершенно твердыми, иначе они могли бы быть подверженными изменениям из-за внешнего воздействия, и, следовательно, не могли бы быть атомами.

4. Атомы являются однородными, лишенными внутренней структуры. Это фактически есть следствие абсолютной твердости атомов.

5. Атомы различаются по размерам и форме. К различию атомов по размеру и форме Эпикур добавил еще различие по их весу.

Таким образом, атомистические представления были построены на основе логического метода, как и в современной науке, вместе с тем эти представления и выводы не имели и не могли иметь в то время какого-либо количественного обоснования; В учении Демокрита-Эпикура ничего не говорилось также о механизмах притяжения между атомами, и для объяснения сцепления они наделяли атомы какими-то крючками или шероховатостью. Однако они считали, что *«подобное стремится к подобному»*. Но не надо думать, что с атомистическими представлениями были согласны все ученые. Напротив, Аристотель резко выступил против атомного учения. Он считал, что единственным источником наших знаний являются наблюдения.

Поэтому Аристотель выступил резко против учения Демокрита-Эпикура, поскольку в этом учении наблюдаемые свойства чувственно ощущаемых предметов истолковывались с помощью атомов, которые сами недоступны прямому наблюдению. Кроме того, материя по Аристотелю является непрерывной («природа не терпит пустоты»), а непрерывное не может состоять из бесконечного числа «неделимых» атомов. Так случилось, что учение Аристотеля было канонизировано церковью, поскольку Аристотель, в частности, считал Землю центром Мироздания, а атомистические идеи Демокрита стали считаться безбожными. Обосновывалось это, например, так: *«Демокрит из Абдеры говорил, что нет конца Вселенной, следовательно, она не могла быть создана какой бы то ни было внешней силой»*. Атомы не признавались католической церковью еще потому, что если все во Вселенной, в том числе Бог, состоит из атомов, то возникает еретический вопрос: кто и когда создал атомы? Поэтому учение Демокрита было отброшено, а сочинения, содержащие атомные идеи и представления, уничтожались.

Атомная гипотеза в многовековый период гонений

Древнегреческий атомизм фактически перестал развиваться уже в III в. до нашей эры благодаря безусловному авторитету Аристотеля, резко выступавшему против атомных представлений Левкиппа-Демокрита. Против идеи об атомах выступали также другие знаменитые люди древности, такие как Цицерон (106—43 гг. до н.э.), Сенека (около 4 до н.э. - 65 н. э.), Гален (около 130-200 гг. н.э.) и др. Наряду с этим имеются сведения, что не все в то время отрицали существование атомов. Например, Герон Александрийский использовал атомную идею, чтобы объяснить сжатие и разрежение. Вместе с тем он отрицал существование распространенного вакуума и допускал лишь вакуум между атомами. В Средние века многие церковные иерархи выступали против учения об атомах, вознося идеи Аристотеля до уровня Священного писания. Однако это не привело все-таки к полному забвению атомных представлений. Но официальная церковь рассматривала атомизм как опасное и нечестивое учение. Сохранились сведения о том, что в Париже некто Никола из Отрекура (1347) разъяснял, что в природе нет ничего, кроме движения, соединения и разъединения атомов. Но вскоре он вынужден был отречься от своих взглядов, а его сочинение было публично сожжено. Во времена, когда была найдена и опубликована поэма Лукреция «О природе вещей», идеи об атомах и пустоте считались полнейшей фантазией. И все же атомные идеи не погибли. Такие идеи разделяли Никола Кузанский, Джироламо Фра-касторо, Джордано Бруно, Галилео Галилей и др. Постепенно на протяжении XV-XVII вв. возникали попытки объяснять некоторые наблюдаемые в природе процессы наличием невидимых частиц, и в учебнике «Наставления физики», написанном в 1638г. Иоганном Шперлингом (1603-1658) в Виттенбергском университете, говорилось: *«Учение об атомах не столь ужасно, как это кажется многим. Позорной язвой нашего века является осмеяние, освистывание,*

осуждение всего, о чем не сразу можно высказать свое мнение..., ничего не стоит сказать, что Эпикур бредил, что Демокрит безумствовал, что древние были дураками. Истина зависит от вещей, а не от человеческих мозжечков». Значительную роль в популяризации атомистического учения сыграл французский философ и просветитель Пьер Гассенди, который в 1649 г. излагая учение древних греков об атомах, стремился доказать, что атомизм не имеет отношения к атеизму, и считал, что атомы сотворены Богом и двигаются они не сами по себе, а по воле Бога. И все же выступление с идеями атомизма было рискованным, потому что инквизиция преследовала любые идеи, если они противоречили догматам того времени.

Большой вклад в развитие представлений о строении вещества и о механизмах физических процессов внесли Рене Декарт и Роберт Бойль. Декарт считал, что материя есть *«телесная субстанция»*, которая отличается от *«той первой материи философов, которую они настолько хорошо лишили всех ее форм и качеств, что у нее уже ничего не осталось доступного ясному пониманию»*. По Декарту материя в принципе делима до бесконечности и разделена на разнообразные мельчайшие частицы. Эти частицы - *«элементы»* - состоят из одного и того же первичного вещества, но отличаются друг от друга формой и размерами. Он считал, что существуют элементы трех видов - элементы огня, воздуха и земли. Эти частицы находятся в постоянном бесконечном движении. Поэтому все в мире постоянно изменяется. При этом все движения, происходящие в мире, сводятся исключительно к механическим перемещениям.

Атомную гипотезу разделял великий физик Ньютон. Ньютон в своих трудах не раз ссылался *«на авторитет греческих и финикийских философов, которые приняли вассит и атомы, и тяготение атомов, как первые принципы своей философии... Однако об атомах, как неделимых хотя бы вэпикурейском смысле, Ньютон никогда не говорит, предпочитая неопределенное и широкое понятие частиц или корпускул»*. Свои представления об атомах Ньютон изложил в третьем томе «Оптики»: *«Мне кажется вероятным, что Бог вначале создал материю в виде сплошных, массивных, твердых, непроницаемых, движущихся частиц таких размеров и форм и с такими другими свойствами и в таких пропорциях к пространству, которые наилучшим образом служат той цели, для которой Он их создал, и что эти простейшие частицы, будучи твердыми, несравненно прочнее, чем любые другие тела, составленные из них...»*. Ньютон впервые высказал также предположение о сложном строении частиц тела. Эту примерную картину сложного строения частиц Ньютон пояснил с помощью сил взаимодействия: *«Мельчайшие частицы материи могут сцепляться посредством сильнейших притяжений, составляя большие частицы, но более слабые; многие из них могут также сцепляться и составлять еще большие частицы с еще более слабой силой, и так в ряде последовательностей, пока прогрессия не закончится самыми большими частицами, от которых зависят химические действия и цвета природных тел»*. Таким образом, по Ньютону химические и оптические свойства вещества определяются сложными частицами, а не элементарными корпускулами. Можно только удивляться тому, как Ньютон,

предваряя трехвековое развитие физики и химии, интуитивно предугадывал сложное строение атомов. Вместе с тем Ньютон, следуя своему принципу *«гипотез не измышляю»*, не считал свои предположения о микроскопическом строении вещества за твердо установленные научные факты. Атомистические представления Ньютона принципиально отличались от других тем, что он предполагал возможность существования не только механических, но и других видов взаимодействий между частицами: *«...Притяжение тяготения, магнетизма и электричества простираются на весьма заметные расстояния и, таким образом, наблюдались просто глазами, но могут существовать и другие притяжения, простирающиеся на столь малые расстояния, которые до сих пор ускользают от наблюдения, и, может быть, электрическое притяжение распространяется на такие малые расстояния и без возбуждения трением»*.

Научная основа атомной гипотезы

У древних мыслителей и их последователей представление об атомах явилось результатом простых наблюдений и размышлений, т.е. атомы воспринимались как *«любопытная гипотеза, допустимая с точки зрения нашей познавательной способности»*. Но атомная гипотеза оказалась очень плодотворной, когда началось количественное изучение химических превращений. На основе этой гипотезы английский химик и физик Джон Дальтон (1766-1844) в 1802-1804 гг. сформулировал понятия о химическом элементе и атомном весе и составил первую таблицу атомных весов элементов.

Дальтона называют *Отцом химической атомной теории*. Ради справедливости следует сказать, что еще в 1661 г. Роберт Бойль в своем труде *«Химик-скептик»* впервые ввел понятие химического элемента как простейшей составной части тела. Основные идеи Дальтона заключаются в следующем:

1. Химические элементы состоят из атомов, представляющих собой чрезвычайно мелкие, дискретные, неделимые и неразрушаемые частицы. Они сохраняют свои свойства при всех химических и физических изменениях. В этом Дальтон является последователем учения Демокрита. По Дальтону, *элемент* - это химическое вещество, которое не может быть дальше разложено химическими средствами, такими как нагревание, химические реакции и т.п. Атомы данного элемента не могут изменяться в химических реакциях с атомами других элементов.

2. Атомы данного элемента имеют одинаковые свойства, в том числе одинаковые массы. После открытия изотопов стало ясно, что на самом деле это неверно, но во времена Дальтона это положение играло важную роль.

3. Атомы разных элементов имеют разные массы. Это положение также находилось в русле учения древнегреческих мыслителей. Однако в отличие от них Дальтон не просто сформулировал положение, но разработал эффективный метод определения в числах относительных весов атомов на основе имеющихся химических

данных. Вскоре было выяснено, что элементов (и атомов) не бесконечно много, как представлял себе Демокрит, а вполне счетное количество. Во времена Дальтона было известно около 40 элементов, а теперь – свыше 118. Таким образом, огромное количество различных веществ в природе составлено из сравнительно небольшого набора атомов.

4. Атомы комбинируются в малых целочисленных пропорциях, например, 1:1, 1:2, 2:3 и т.д.

Дальтон впервые ввел числа в представление об атомах, что дало возможность получить из атомной гипотезы наблюдаемые следствия. Так из абстрактного философского понятия атом становился реальным объектом научного исследования.

Были сформулированы два фундаментальных химических закона - *закон постоянства состава* и *закон простых кратных отношений* (Праут, 1799, Дальтон, 1808). Было также установлено Ломоносовым в 1756г. и Лавуазье в 1774г., что в химических реакциях должен выполняться *закон сохранения массы вещества*. Было замечено, что весовые количества химических элементов, вступающих в реакцию и образующих химические соединения, находятся во вполне определенных отношениях. Например, оказалось, что вода образуется в результате реакции при отношении весовых количеств водорода и кислорода 1:8, т.е. соединение 1 г водорода с 8 г кислорода образует 9 г воды. В случае газов простые закономерности наблюдаются не только для масс реагирующих веществ, но и для их объемов.

Была введена количественная величина - *атомный вес* (теперь пользуются другой величиной, которая называется - *атомная масса*). Свои выводы, основанные на атомной гипотезе, Дальтон опубликовал в 1808 г. в книге «*Новая система химической философии*». Книга Дальтона послужила мощным толчком для дальнейшего развития науки.

В 1814г. «король химиков» Берцелиус, изучив огромное количество веществ, опубликовал таблицу атомных весов 41 химического элемента и ввел обозначения - химическую символику элементов, которые используются и в настоящее время.

Вместе с тем во времена Дальтона не все признавали атомную гипотезу. Характерно высказывание французского химика Сент-Клэр Девиля: «*Я не допускаю ни закона Авогадро, ни атома, ни молекулы, ибо я отказываюсь верить в то, что я не могу ни видеть, ни вообразить*». И все же атомно-молекулярные представления продолжали развиваться, поскольку результаты, полученные на основе этих представлений, подтверждались в экспериментах. Методы определения атомных и молекулярных весов в химии основываются, как правило, на законе итальянского физика Амадео Авогадро (1776-1856), который был открыт в 1811 г. Этот закон гласит: *в равных объемах различных газов при одинаковых давлениях и температурах содержится одинаковое число молекул*. Известно, например, что 2 грамма молекулярного водорода занимают объем 22,4 л. Допустим, что число молекул в этом объеме равно N_A . Столько же и молекул кислорода в этом объеме, но масса молекул кислорода равна 32 граммам. Отсюда опять же следует, что атом кислорода по массе в

16 раз больше атома водорода. Таким образом, измеряя плотность какого-нибудь газа и сравнивая ее с плотностью водорода, можно сразу определить атомную массу этого газа, т.е. величину, которая недоступна непосредственному восприятию. Число молекул, которые находятся в 22,4 л (объем одного моля) любого газа при температуре 0° С и нормальном давлении, называют *постоянной Авогадро*:

$$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ частиц/моль.}$$

Следуя Дальтону, многие химики того времени широко пользовались представлениями об атомах и молекулах. Вместе с тем четкого различия между этими понятиями еще не было. Вводились такие термины, как *«сложные атомы»*, *«элементарные молекулы»*. В 1860 г. на Международном химическом конгрессе, проходившем в немецком городе Карлсруэ, путем голосования было принято решение о различии понятий «атом» и «молекула». Этим был положен конец существовавшей тогда неразберихи с терминологией. Для химиков представление об атомах давало ключ к пониманию химических реакций. Например, Менделеев считал, что атомы неделимы в химическом смысле, *«подобно тому, как при рассмотрении людьми отношений между ними человек есть неделимая единица»*. Вместе с тем индивидуальность атомов он объяснял глубокой и сложной структурой их *«внутренних движений»*. Он полагал, что *«мир атомов устроен так же, как мир небесных светил, со своими солнцами, планетами и спутниками»*.

Атомно-молекулярную гипотезу успешно развивали не только химики. Эта гипотеза лежала в основе молекулярно-кинетической теории, которая блестяще объясняла газовые законы, явления переноса и т.п. И хотя в то время не было прямых доказательств существования атомов, но большинство физиков без колебаний принимало атомную гипотезу. В частности, Максвелл считал себя последователем Демокрита, Эпикура, Лукреция. Он не только не сомневался в существовании атомов, но и задумывался об их структуре. Развивая кинетическую теорию, Максвелл особо отмечал важность атомной гипотезы: *«Из гипотезы, согласно которой мельчайшие части материи находятся в быстром движении, причем скорость этого движения возрастает с температурой, может быть выведено так много свойств материи, особенно если взять ее в газообразной форме, что истинная природа этого движения является предметом естественного интереса»*.

Несмотря на очевидные успехи молекулярно-кинетической теории атомные представления о строении вещества оставались лишь гипотезой, которая воспринималась не всеми учеными. Так, известный философ Шопенгауэр (1788-1860) считал атомы *«выдумкой невежественных аптекарей»*, австрийский физик и философ Эрнст Мах (1838-1916) отрицал кинетическую теорию, реальность атомов и молекул и называл последователей атомистики *«общиной верующих»*, немецкий физик и химик Оствальд (1853-1932) был уверен, что *«атомы будут существовать только в пыли библиотек»*. Эти идеи пытались внедрить и в сознание студентов. Так известный шотландский физик Тэт (1831-1901) в учебнике по физике в 1885 г. писал: *«Твердый атом... живет в виде невероятной, но все еще не опровергнутой гипотезы и поднесь...*

Однако несравненно правдоподобнее теория, по которой материя непрерывна, то есть не состоит из частиц с промежутками». В ответ на доказательства сторонников атомистики их противники утверждали, что атомная гипотеза «является примитивной тенденцией видеть за всеми физическими явлениями механическую модель» и язвительно замечали: «А вы хоть один атом видели?» Особенно остро переживал нападки на атомные представления Больцман. «Я последний, кто отрицает возможность построения любой иной картины мира, кроме атомической», - говорил он с горечью. Постоянные нападки на Больцмана и травля его со стороны противников кинетической теории вызвали у него манию преследования. Возможно, что именно это привело его к личной трагедии – он покончил с собой.

Существуют ли атомы?

Большинство физиков XIX в. не сомневалось в существовании атомов. Собственно результаты атомно-молекулярной теории, согласующиеся с опытными фактами, уже являлись косвенным подтверждением атомной гипотезы. И все-таки нужны были опыты, непосредственно подтверждающие реальность атомов. Одним из первых был опыт, выполненный в 1827 г, шотландским ботаником Робертом Броуном (1773-1858). Он обнаружил, что мельчайшая пыльца растений скачкообразно движется в воде под действием какой-то силы. Долгие годы не удавалось объяснить это явление. Лишь в конце XIX в. стали думать, что видимые в микроскоп беспорядочные движения пылцы растений вызваны не ими самими или внешними по отношению к жидкости причинами, а внутренними движениями, присущими жидкости, т.е. что броуновское движение обусловлено столкновениями молекул жидкости с взвешенными в ней частицами.

Дельсоль и Карбонель в 1877 г. выдвинули предположение, что броуновское движение вызывается неуравновешенностью ударов молекул жидкости о поверхность взвешенной частицы. Это удалось убедительно доказать на опыте лишь в 1908-1909 гг. французскому физiku Жану Перрену. К тому времени Эйнштейн и Смолуховский построили теорию броуновского движения. Теория Эйнштейна была опубликована в 1905 г. в статье с названием «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты». Эйнштейн писал: «В этой Работе должно быть показано, что, согласно молекулярно-кинетической теории теплоты, взвешенные в жидкости тела микроскопических размеров вследствие молекулярного теплового движения должны совершать такие движения, которые легко могут быть обнаружены под микроскопом. Возможно, что рассматриваемые здесь движения тождественны с так называемым «молекулярным броуновским движением»; однако доступные мне данные относительно последнего настолько неточны, что я не мог составить себе об этом определенного мнения. Если рассматриваемое здесь движение вместе с ожидаемыми закономерностями действительно будет наблюдаться, то классическая термодинамика уже для

микроскопически различных областей не может считаться вполне действительной, и тогда возможно точное определение истинных атомных размеров. Если же, наоборот, предсказание этого движения не выполнится, то это будет веским аргументом против молекулярно-кинетического представления о теплоте». Таким образом, Эйнштейн придавал своей теории и следствиям из нее важное принципиальное значение. Он и Смолуховский справедливо считали, что не нужно рассматривать истинный путь, проходимый броуновской частицей. Надо рассматривать среднее смещение центра массы частицы за определенный промежуток времени.

Таким образом, измеряя под микроскопом среднее смещение броуновской частицы за время t и зная другие величины, с использованием формулы Эйнштейна можно определить постоянную Авогадро.

В своих опытах Перрен изготавливал однородную эмульсию броуновских частиц, т.е. частиц шарообразной формы одинакового радиуса, из гуммигута или мастики. Различными остроумными способами Перрен определял с большой точностью радиус шариков эмульсии и их плотность. Если поместить такую эмульсию в жидкость, то в результате броуновского движения частицы будут стремиться распределиться по всему объему жидкости. Первые опыты Перрен провел над распределением концентрации эмульсии в поле силы тяжести. С молекулярно-кинетической точки зрения при равновесии должна установиться «эмульсионная атмосфера», в которой концентрация должна подчиняться барометрическому закону.

На основании своих измерений Перрен пришел к окончательному выводу: *«Нельзя не удивляться, видя, как согласуются между собой результаты исследования столь различных явлений. Если мы вспомним, что одна и та же величина получается в результате варьирования условий и явлений, к которым прилагаются эти методы, - мы приходим к заключению, что реальность молекулы имеет вероятность, весьма близкую к достоверности».*

После опытов Перрена Оствальд, упорно отрицавший вместе с Махом реальность атомов и молекул, в 1908 г. писал: *«Я убедился, что мы недавно получили экспериментальное доказательство дискретного или зернистого строения вещества».* Подводя итог своим экспериментам, Перрен в 1912г. говорил: *«Атомная теория восторжествовала. Некогда многочисленные ее противники повержены и один за другим отрекаются от своих взглядов, в течение столь длительного времени считавшихся обоснованными и полезными».*

Другое убедительное доказательство атомистического строения вещества представили Резерфорд и Ройдс в 1909 г. Резерфорд и Ройдс использовали явление радиоактивного распада и свойства возникающих при этом α -частиц. Они установили, что число атомов в 1 см^3 величина очень близка к числу Лошмидта, полученному на основе молекулярно-кинетических представлений.

Таким образом, в начале XX в. атомно-молекулярная гипотеза была непосредственно доказана, и уже ни у кого она не вызывала сомнений. Но, как

говорил Эйнштейн: *«К сожалению, законы природы становятся вполне понятными только тогда, когда они уже неверны»*. Дело в том, что к тому времени накопилось уже большое количество опытных фактов, которые неумолимо приводили к выводу, что атом, представляемый как мельчайшая неделимая, т.е. бесструктурная частица вещества, в природе не существует! Так что еще до опытов Перрена возникла проблема структуры атома, т.е. встал вопрос о том, из чего состоит атом, как он устроен.

Каковы же факты, которые лишили первоначальное понятие «атом» его прежнего смысла? Прежде всего, это - открытие дискретности электрического заряда и открытие электрона как частицы, несущей наименьший электрический заряд. Далее - явления радиоактивности и радиоактивного превращения элементов, рентгеновское излучение, спектры светящихся тел и многие другие факты. Надо отметить, что выдающиеся физики прошлого уже предполагали, что атом не является бесструктурной частицей. Выше были приведены высказывания Ньютона по этому поводу. А Фарадей в 1834 г. писал:

«Имеется огромное количество фактов, заставляющих нас думать, что атомы вещества каким-то образом одарены электрическими силами или связаны с ними и им они обязаны своими наиболее замечательными свойствами». О том, что атом не может быть бесструктурным, говорил также Максвелл.

Помимо открытия электрона важную роль в развитии физики атома сыграли другие открытия конца XIX в. В 1895 г. немецкий физик из университета Вюрцбурга Вильгельм Рентген (1845-1923), как и многие другие физики того времени, проводил исследования катодных лучей.

Однажды он обратил внимание, что полоска бумаги, покрытая флуоресцирующей солью бария и лежащая в стороне от работающей трубки Крукса, светится. После многочисленных экспериментов и долгих напряженных размышлений он пришел к выводу, что им открыты новые, как он называл, *X—лучи*. Они возникали в том месте, куда попадали катодные лучи. *X-лучи* называют также *рентгеновским излучением*. За открытие *X-лучей* Рентген стал *первым Нобелевским лауреатом* по физике в 1901 г.

Исследования Рентгена показали, что *X-лучи* в магнитном поле не отклоняются и, следовательно, не являются потоком заряженных частиц. Однако он не обнаружил преломления и дифракции *X-лучей* и высказал гипотезу, что эти лучи являются своеобразными *продольными* электромагнитными волнами. Лишь опыты английского физика Чарлза Баркла (1877-1944) в 1905 г. по рассеянию *X-лучей* показали, что, если это излучение имеет волновую природу, то оно должно быть поперечно поляризовано. Баркла установил также, что имеются разные типы рентгеновского излучения. Существует *тормозное* рентгеновское излучение. Оно образуется при торможении электронов в антикатоде и не зависит от материала антикатада. Тормозное излучение имеет сплошной спектр. Его называют также *белым* рентгеновским излучением. Наряду с этим наблюдается *характеристическое* рентгеновское излучение, которое

существенно зависит от материала, из которого сделан антикатод. Характеристическое излучение является линейчатым - оно состоит из отдельных линий, характерных для данного вещества. В 1912г. немецкий физик Макс Лауэ (1879-1960) разработал теорию интерференции рентгеновских лучей, предложив рассматривать кристаллы как дифракционные решетки для рентгеновского излучения. В том же году эта теория была блестяще подтверждена экспериментально сотрудниками Лауэ Вальтером Фридрихом (1883-1968) и Паулем Книппингом (1883-1935). Так было доказано, что рентгеновское излучение, так же как и свет, представляет собой поперечные электромагнитные волны. Только в отличие от света рентгеновское излучение характеризуется гораздо меньшими длинами волн – около $10^{-8} - 10^{-9}$ см. За открытие дифракции рентгеновского излучения Лауэ в 1914 г. был удостоен Нобелевской премии.

В 1912г. английский физик Генри Брэгг (1862-1942) и его сын Лоуренс (1890-1971) использовали явление дифракции рентгеновского излучения на кристаллах для изучения кристаллических структур. Они определили длину волны излучения и константы кристаллической решетки, заложив основы рентгеноструктурного анализа. За эти исследования они были удостоены Нобелевской премии в 1915г.

В 1896 г. французский физик Антуан Беккерель (1852-1923) по счастливому стечению обстоятельств открыл еще более странный по тем временам тип излучения.

История открытия Беккереля такова: он изучал актуальный в то время вопрос о возможности испускания X-лучей фосфоресцирующими веществами (урановыми рудами) после длительного их облучения солнечным светом. Он подготовил опыт, но осуществить его сразу не удалось, потому что погода испортилась, и солнце появлялось лишь на короткое время. Его установка содержала фотопластинку в рамке из черной ткани, прикрытую алюминиевой пластинкой. На этой пластинке находился тонкий медный крест и над ним располагался препарат с двойным сульфатом калия и урана. В ожидании хорошей погоды он все это запер в ящике своего стола. Так и не дождавшись улучшения погоды, Беккерель к счастью решил проявить фотопластинку. Он был сильно удивлен, когда увидел на ней после проявления весьма четкий контур креста. Так неожиданно оказалось, что для получения фотографического эффекта вовсе не надо предварительно освещать урановую руду солнечным светом. Беккерель пришел к выводу, что все соли урана независимо от своего происхождения испускают излучение одной и той же природы, интенсивность которого зависит только от количества урана, содержащегося в соли, т.е. способность к излучению является чисто атомным свойством, характерным для элемента урана. В 1898 г. Мария Склодовская-Кюри (1867-1934) обнаружила, что соли тория тоже испускают такие лучи. Продолжая свои поиски, после долгой и упорной работы она вместе со своим мужем французским физиком Пьером Кюри (1859-1906) открыла два новых элемента. Первый они называли *полонием* (в честь Польши - родины Марии Склодовской-Кюри). Другой элемент, химические свойства которого сходны с барием, называли *радием*. Интенсивность излучения радия оказалась намного больше интенсивности излучения урана. В 1898 г.

супруги Кюри ввели термин *«радиоактивность»* для обозначения свойства вещества испускать *«лучи Беккереля»*. За открытие радиоактивности Беккерелю и за работы по исследованию радиоактивности супругам Кюри была присуждена Нобелевская премия в 1903 г.

В конце 1899 г. Беккерель обнаружил, что испускаемые лучи неоднородны и имеют корпускулярную природу, перенося электрический заряд, - в магнитном поле часть лучей отклоняется в одном направлении, а другая - в противоположном. Этот факт подтвердил также Резерфорд. Он писал: *«Эти опыты показывают, что излучение урана является сложным и состоит по крайней мере из двух различных видов: одно, очень быстро поглощаемое, назовем для удобства α -излучением; другое, более проникающее, назовем β -излучением»*. Беккерель показал, что β -лучи, испускаемые разными радиоактивными веществами, имеют разные скорости и отклоняются электрическим полем. Он впервые измерил отношение заряда β -частиц к их массе, и установил, что это отношение такого же порядка как и для катодных лучей. Супруги Кюри установили, что эти лучи несут отрицательный заряд. Теперь хорошо известно, что α -лучи представляют собой ядра атомов гелия, но на доказательство этого факта Резерфорду понадобилось 10 лет трудных экспериментов. Эксперименты Резерфорда и английского физико-химика Содди (1877-1956) позволили объяснить известный в то время странный факт: во всех минералах, содержащих радиоактивные вещества, всегда присутствует гелий. Они показали, что гелий ни откуда не попадает в радиоактивные вещества, а образуется в них - радиоактивное излучение само в себе содержит дважды ионизованные атомы гелия. Этот вывод поставил под сомнение существовавшее со времен Лавуазье и Дальтона убеждение, что химические элементы вечны и неизменны и что они не могут переходить друг в друга. Дальнейшие исследования Резерфорда, Содди и Ройдса привели к открытию радиоактивного распада элементов. Таким образом, Резерфорд нашел пути и законы естественного превращения элементов. Другими словами, он доказал *делимость* атомов. В 1908г. Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии за раскрытие природы радиоактивного распада.

В 1903 г. Пьер Кюри обнаружил, что соли урана непрерывно выделяют тепло, причем очень большое, если учесть небольшую массу радиоактивного препарата. По этому поводу Резерфорд отмечал: *«...теперь точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях»*.

В своей книге «Современное развитие физики» английский ученый Ветгем в 1904 г. писал: *«Профессор Резерфорд в шутку передавал автору этой книги тревожную мысль, что если бы удалось открыть надлежащий детонатор, то можно было бы вызвать волну взрыва атомического разложения во всем веществе, которое произвело бы превращение всей массы нашего земного шара и оставило бы от него только клуб гелия»*. В то же время обнаружилось смертоносное воздействие

радиоактивного излучения на живые организмы. Это взбудоражило общественность, и был поднят вопрос о пользе и необходимости научных исследований. Пьер Кюри после присуждения ему Нобелевской премии в 1905 г. говорил: *«Я склонен придерживаться точки зрения Нобеля, что человечество извлечет из новых открытий больше хорошего, чем плохого»*.

В 1834 г. английский физик Уильям Тальбот (1800-1877), изобретатель фотографии на бумаге, высказал идею, что каждая светлая линия в спектре излучения является характерной для излучающего ее элемента. Создателями спектрального анализа и первыми исследователями атомных спектров стали немецкие ученые Кирхгоф и Бунзен (1811-1899). В 1860 г. они опубликовали работу *«Химический анализ с помощью наблюдений спектра»*, в которой изложили основы спектрального анализа атомов. Их успешным экспериментальным работам по спектральному анализу способствовали «горелка Бунзена» и специальный спектрограф большой разрешающей силы.

Кирхгоф и Бунзен открыли *закон инверсии (обращения) спектра*: все газы поглощают в точности те же длины волн, которые они способны излучать.

Спектральный анализ света, приходящего от звезд, позволил сделать важный вывод, что Вселенная состоит из одних и тех же химических элементов. Это было важно потому, что долгое время существовало убеждение, что небесные тела состоят из того, чего нет, и не может быть на Земле.

В 1868г. шведский физик Андерс Ангстрем (1814—1874) измерил длины волн четырех линий видимой части спектра атомарного водорода – *H α , H β , H γ , H δ* . В это время ирландский физик Стони предположил, что *«линии в спектрах газов должны быть связаны с периодическими движениями внутри отдельной молекулы, а не с беспорядочным движением молекул относительно друг друга»*, при этом он считал, что *«одно периодическое движение в молекуле накаливаемого газа может быть источником целой серии линий в спектре газа»*. Стони воспользовался измерениями Ангстрема и показал, что три из известных линий атома водорода являются *«20-й, 27-й и 32-й гармониками фундаментального колебания, длина волны которого в вакууме равна $\lambda_0=3127714$ мм.»* Дальнейшие спектроскопические исследования привели к пониманию важности поисков *«эмпирического закона, связывающего различные периоды колебаний, в которых, как мы знаем, может принимать участие одна и та же молекула»* (1881). Такой закон в 1885 г. открыл школьный учитель в Базеле Иоганн Бальмер (1825-1898).

Бальмер нашел эмпирическую формулу, с помощью которой можно с удивительной точностью определить длины волн этих линий:

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^4 - 4}.$$

Здесь n – целое число, равное 3, 4, 5, 6. Эмпирическая постоянная $B = 3647,0 \text{ \AA}$.

При $n = 3$ по этой формуле определялась длина волны красной линии $H\alpha$, при $n = 4$ - зеленой линии $H\beta$, при $n = 5$ - синей линии $H\gamma$, при $n = 6$ - фиолетовой линии $H\delta$. При больших значениях числа n длины волн соответствуют ультрафиолетовой области, не различимой глазом. В последующих опытах они также были обнаружены. Этот набор спектральных линий стали называть *бальмеровской серией*. Другой вид формулы Бальмера оказался чрезвычайно плодотворным для дальнейшего развития атомной спектроскопии.

Ее предложил шведский физик Иоганнес Ридберг (1854-1919), в 1890 г. записал формулу Бальмера в виде, где присутствовало больше членов, в частности скорость света в вакууме. Из формулы Ридберга легко получалась обобщенная формула Бальмера. Из нее следовала серия Лаймана в ультрафиолете, серия Бальмера и т.д. Совокупность всех спектральных серий образуют *спектр* данного атома. Таким образом, обобщенная формула Бальмера описывает спектр атома водорода и представляет собой его своеобразный «портрет», а бальмеровская серия является лишь видимой цветной частью этого портрета. Другие атомы имеют совсем другие спектры, и их спектральный портрет, конечно, не описывается обобщенной формулой Бальмера. Каждый атом имеет свой собственный характерный для него спектр, и по этому спектру он может быть определен.

Спектральные закономерности атома водорода были найдены Бальмером, Ридбергом, Ритцем и другими чисто опытным путем, только на основе результатов измерений. Они носили эмпирический характер и считались *«забавной игрой чисел»*. Долгое время не удавалось объяснить, почему образуется этот частокол отдельных линий определенного цвета, выстроенных в закономерной последовательности, пока многочисленные экспериментальные факты не привели к возникновению квантовых представлений. Таким образом, открытие электрона, X-лучей, лучей Беккереля, явления радиоактивности и радиоактивного превращения элементов, спектральных закономерностей и других явлений неумолимо приводили к выводу, что атом не является неделимым, что он как-то устроен. Между прочим, еще Лейбниц прозорливо отмечал: *«Нет последнего мельчайшего тела, ... частичка материи как бы мала она ни была, есть целый мир, полный бесконечного множества творений, еще более мелких»*.

МОДЕЛИ АТОМА

Считается, что идею о сложном строении атома впервые высказал английский врач Уильям Праут (1785-1850) еще в 1815г. Он предположил, что все атомы состоят из атомов водорода, количество которых определяется атомным весом.

В начале XX в. существовали разные и, возможно, фантастические представления о строении атома - атомные модели. Например, по теории *«вихревого атома»* лорда Кельвина атом устроен подобно кольцам дыма, выпускаемым из рта опытным курильщиком. Некоторые верили, что *«атом кислорода имеет форму кольца, а атом серы - форму лепешки»*, и т.д. Но были и другие представления. Жан Перрен в 1901 г. рассматривал *«нуклеарно-планетарную структуру атома»*. Он считал, что в центре атома находится положительно заряженная частица, которая окружена некоторым количеством электронов, компенсирующих положительный заряд. Предполагалось, что эта система зарядов под действием внутренних электромагнитных сил является динамически стабильной, при этом периоды обращения системы связывались с соответствующими частотами (длинами волн) спектра излучающего атома. Аналогичные соображения высказывал в 1904г. японский физик Нагаока (1865-1950), предложивший так называемую *«сатурнианскую»* модель атома. В 1908 г. Пуанкаре писал: *«Все опыты над проводимостью газов... дают нам основание рассматривать атом как состоящий из положительно заряженного центра и, по массе равному приблизительно самому атому, причем вокруг этого центра вращаются, тяготея к нему электроны»*.

Таким образом, представления о планетарном строении атома были довольно распространены в начале XX в. и о них даже писали в учебниках. Однако все эти соображения не были подкреплены экспериментом и носили, в общем, умозрительный характер.

В 1903 г. Дж.Дж. Томсон предложил *«капельную»* модель атома, или модель *«пудинга»*, которая широко использовалась в свое время. Согласно этой модели атом рассматривался как *«сфера однородной положительной электризации»*, внутри которой вкраплено (как изюминки в пудинге) определенное количество электронов, нейтрализующих положительный заряд атома. Испускание света атомом рассматривалось как результат квазиупругих колебаний электронов около их предполагаемых положений равновесия. Однако это, естественно, не могло объяснить наблюдаемые спектры атомов. Кроме того, было совершенно непонятно, как при непрерывно распределенном положительном заряде в атоме могут возникать α -частицы с дискретным зарядом.

Первые опыты по изучению строения атома проводил Ленард в 1903 г. с помощью катодных лучей - пучка электронов. Если бы атомы представляли собой

массивные непроницаемые шарики, то в результате столкновений с ними электроны очень скоро бы остановились. Однако опыты Ленарда показали, что быстрые электроны почти не тормозятся атомами. Отсюда можно было сделать вывод, что внутри атома имеется «пустое» пространство. Для объяснения этих фактов Ленард предложил «динамидную» теорию атома, которая оказалась неудовлетворительной. Лишь Резерфорду в 1911 г. удалось сформулировать и экспериментально обосновать модель атома, которую называют *ядерной*, или планетарной. Разрешение трудностей этой модели привело затем к современным представлениям о строении атома.

Имеет ли атом планетарное строение?

Эрнест Резерфорд (1871-1937) в 1914 г. высказал идею об искусственном превращении атомных ядер. Совместно с Андраде (1887-1971) он доказал идентичность рентгеновских спектров изотопов, чем было окончательно подтверждено равенство порядковых номеров у изотопов данного элемента. В 1919 г. он осуществил первую искусственную ядерную реакцию, превратив азот в кислород. Так были заложены основы современной физики атомного ядра. Совместно с Олифантом он экспериментально доказал справедливость закона взаимосвязи массы и энергии в ядерных реакциях (1933) и осуществил реакцию синтеза дейтронов с образованием трития (1934).

Схема первоначальных опытов Резерфорда, которые он начал в 1906г., была очень проста. От радиоактивного источника α -частицы проходили через узкое отверстие, затем попадали на фотопластинку, на которой регистрировалось четкое изображение щели. Резерфорд заметил, что когда в стеклянной вакуумной установке, в которой проводился эксперимент, находится воздух или какой-нибудь газ, то изображение щели становится размытым. Это нельзя было рассеянием при столкновении с атомами газа, т.к. α -частицы обладают большой массой (они примерно в 7360 раз тяжелее электронов) и движутся с большой скоростью - около 20 км/с. Поэтому даже небольшое отклонение быстрых массивных частиц означает, что в атоме существуют значительные силы, вызывающие их отклонение. Чтобы объяснить отклонение α -частиц в среднем всего на 2° , необходимо было допустить, что в атомах имеются огромные электрические поля с напряженностью свыше 200 кВ/см. Было неясно, откуда берутся поля с такой напряженностью. Дальнейшие опыты продолжили под руководством Резерфорда его ученики Гейгер (1882-1945) и Марсден (1889-1970). Они изучали рассеяние α -частиц очень тонкими пластинками - фольгами толщиной около 0,01 мм из золота, платины и других материалов. Столь тонкие фольги укреплялись на стеклянной пластинке, которая сама по себе была прозрачной для α -частиц, т.е. не вызывала их отклонения. Отклонение α -частиц на определенный угол от первоначального направления движения регистрировалось спинтарископом. Они скрупулезно подсчитывали процент частиц, отклоненных на разные углы.

Выполненные в 1909 г. опыты показали, что большинство α -частиц отклоняется на очень малые углы, небольшая их часть отклоняется на 90° от первоначального направления, и есть ничтожно малая доля частиц, которые отражаются назад, т.е. рикошетят. В опытах с платиновой фольгой было найдено, что лишь одна из восьми тысяч частиц испытывает отражение назад. Такой результат сильно потряс Резерфорда.

В то время были распространены представления Томсона, согласно которым рассеяние частиц на большой угол является результатом их малых последовательных отклонений при столкновениях с атомами. Однако опыты с очень тонкими фольгами неумолимо показывали, что большие отклонения α -частиц происходят при их однократном столкновении с атомами фольги.

Основываясь на представлении о том, что положительный заряд атома сосредоточен в малом его объеме, Резерфорд в 1911 г. разработал теорию рассеяния α -частиц. Позднее, в 1912 г. центральный заряд атома Резерфорд назвал *ядром*. Теория Резерфорда была тщательно проверена в опытах Гейгера и Марсдена в 1913г.

Помимо экспериментального подтверждения существования ядра у атома, результаты Гейгера и Марсдена означали также, что закон Кулона, положенный в основу представлений о взаимодействии α -частиц с ядром, оказывается справедливым на атомных расстояниях. Итак, опытами Резерфорда и его сотрудников было надежно установлено существование положительного ядра у атома. Это ядро имеет размеры около 10^{-12} см, что намного меньше размеров самого атома - порядка 10^{-8} см. В 1913 г. ученик Резерфорда Генри Мозли (1887-1915), исследуя спектры рентгеновского излучения различных элементов, установил, что число положительных зарядов, содержащихся в ядре, в точности равно порядковому номеру Z данного элемента в периодической системе Д.И. Менделеева. Поскольку атом в целом электрически нейтрален, то отрицательный заряд электронов должен компенсировать положительный заряд ядра, так что в атоме должно быть Z электронов. Окончательный вывод о том, что заряд ядра равен порядковому номеру элемента, был сделан в 1920г. на основании опытов английского физика Чэдвика (1891-1974). Используя этот факт, теперь можно сказать, что такое химический элемент: *химический элемент - это вещество, состоящее из атомов с одинаковым зарядом ядра*.

На основании проведенных опытов Резерфорд в 1911 г. пришел к выводу, что строение атома похоже на Солнечную систему. Ядро является как бы Солнцем, а электроны - планетами. Резерфорд, конечно, понимал трудности этой модели. Дело в том, что планетарное строение атома лишь внешне является сходным с Солнечной системой, и эта аналогия довольно обманчива. В противоположность планетам, связанным силами взаимного притяжения, электроны отталкиваются друг от друга. Притяжение Солнцем внешних планет усиливается притяжением внутренних планет, тогда как в атоме внутренние электроны ослабляют воздействие ядра на внешние электроны - экранируют его заряд. Планеты сильно отличаются друг от друга по многим своим свойствам, а все электроны имеют одну и ту же массу и заряд и являются

неразличимыми, тождественными частицами. К тому же в отличие, например, от томсоновской модели атома планетарная модель не дает возможности оценить размер атома, который к тому времени был известен из молекулярно-кинетической теории. Но самый главный недостаток идеи о планетарном строении атома заключается в следующем: система, состоящая из положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг него электронов, с точки зрения классической электродинамики Максвелла-Лоренца является неустойчивой и, следовательно, не может существовать. В самом деле, по законам электродинамики ускоренно движущийся заряд должен терять свою энергию на излучение, а электрон, вращающийся вокруг ядра, движется с ускорением. Поскольку энергия вращающегося электрона связана с радиусом его орбиты, то с уменьшением энергии из-за излучения уменьшается также радиус орбиты электрона. Процесс излучения происходит непрерывно, и электрон, в конце концов, должен «упасть» на положительный центр притяжения. По мере приближения к ядру электрон должен был бы вращаться все быстрее и быстрее с повышением частоты испускаемого им света. Между тем наблюдается совсем другое: если атом испускает свет, то этот свет характеризуется определенной частотой (набором частот).

Таким образом, эксперименты Резерфорда создали тупиковую ситуацию. Надо было отказываться либо от электродинамики, либо от планетарной модели. Большинство физиков того времени считало, что не следует отказываться от электродинамики, которая подтверждена многочисленными экспериментами и нашла практические применения.

Поэтому на первом Сольвеевском конгрессе (1911), на котором присутствовали выдающиеся физики - Эйнштейн, Планк, Кюри, Ланжевэн и другие, и который был посвящен проблеме квантов и излучения, никто даже не упомянул об идее Резерфорда. Об атмосфере же, царившей в то время в лаборатории Резерфорда, Нильс Бор говорил в 1926г.: *«Весной 1912 года во время моего первого визита в Манчестер, вся лаборатория была взволнована одним из самых крупных открытий, которое в полной мере явилось плодом стараний Резерфорда. Сам Резерфорд и его ученики были всецело поглощены выяснением следствий, вытекавших из его нового взгляда на ядерное строение атома. Представление о том, насколько сильно мы верили в его суждения, будет неполным, если только сказать, что никто в его лаборатории не допускал и тени сомнения в правильности и фундаментальной важности этой точки зрения, хотя в то время она и очень оспаривалась»*. Несмотря на обреченность планетарной модели, сэр Эрнест, прозванный впоследствии знаменитым физиком П.Л.Капицей (1894-1984) *Крокодилом* за то, что он, как грозный крокодил, который никогда не поворачивает назад, действительно не повернул назад и был убежден в правоте своей модели атома. Он говорил тогда: *«Вопрос об устойчивости предлагаемого атома не нуждается в рассмотрении на этом этапе, так как устойчивость, несомненно, зависит от тонкостей строения атома и от движения его заряженных составных частей»*. Первый правдоподобный выход из этого тупика нашел Нильс Бор.

Атом Бора

До 1913г. планетарную модель атома, которую развивал Резерфорд, многие физики старались не замечать, так как по всем законам классической физики атом в такой модели не должен существовать в природе. Кроме того, из величин, характеризующих планетарный атом - заряд, масса электронов и ядер, невозможно составить величину, имеющую размерность длины, которая давала бы оценку размеров атома. Другими словами, в планетарной модели атома его размер оставался неопределенным. В то время в физическом сообществе появился молодой датский ученый Нильс Бор (1885-1962).

Бор сразу же стал сторонником планетарной модели, хотя многими годами позже он признался: *«Я никогда не воспринимал планетарную модель буквально»*. Для Бора это был лишь образ, а не истинное изображение атома. Поскольку атомы в природе существуют и в обычных условиях вполне стабильны, то проблема планетарного атома оказывается проблемой устойчивости электронов, обращающихся вокруг ядер атомов, а это, в свою очередь, сводится к проблеме устойчивости атомных размеров. Из факта существования атомов следует, что должны существовать такие минимальные расстояния от ядра, ближе которых электроны не могут находиться. У Бора возникла гениальная мысль, что должна существовать глубинная связь между двумя минимальными величинами в природе: наименьшим расстоянием электронов от ядра атома и наименьшим квантом действия.

Впоследствии Бор вспоминал: *«В раннюю пору моего пребывания в Манчестере, весной 1912 года, я пришел к убеждению, что строение электронного роя в резерфордском атоме управляется квантом действия - постоянной Планка»*. Это значило, что, принимая планетарную модель атома, необходимо было отказаться от классических представлений. Позднее Бор говорил: *«(Решающим моментом в атомной модели Резерфорда было то, что она со всей ясностью показала, что устойчивость атомов нельзя объяснить на основе классической физики и что квантовый постулат - это единственно возможный выход из острой дилеммы. Именно эта острота несоответствия заставила меня абсолютно поверить в правильность квантового постулата»*.

В конце 1912 г. после завершения стажировки в лаборатории Резерфорда Бор, уезжая в Данию, оставил Резерфорду *«Памятную записку»*, в которой он впервые высказал идею об устойчивости орбит и о связи электронных орбит со строением периодической системы элементов. Это была его грандиозная программа - объяснить не только устойчивость планетарной модели, но и дать объяснение *«свойств материи, зависящих от системы электронов в атоме»*. В ответ Резерфорд посоветовал не спешить с выводами. Но вскоре выяснилось, что спешить было надо. К тому времени в Кембридже астрофизик Дж. Никольсон опубликовал ряд статей, в которых он постулировал, что проекция момента импульса электрона в атоме L квантуется, т.е. принимает целочисленные значения: $L = nh/2\pi$ где n - целое число, h - постоянная Планка. На основе этого постулата Никольсон нашел дискретные орбиты атома, на

каждой из которых, по его предположению, вращались группы электронов. По классическим представлениям, электроны излучают электромагнитные волны с частотой, равной частоте их обращения вокруг ядра. Это и предполагал Никольсон. С помощью такого предположения, приближенно справедливого, как потом оказалось, для сильно возбужденных состояний атомов, Никольсон объяснил многие особенности излучения солнечной короны и туманностей.

Вероятно, последним толчком к научному озарению Нильса Бора стала его случайная встреча в начале февраля 1913г. с сокурсником по Копенгагенскому университету Хансом Хансеном, который был специалистом по спектроскопии и рассказал Бору про формулу Бальмера. *«Как только я увидел формулу Бальмера, все немедленно прояснилось передо мной»*. Это была минута научного озарения, и за короткий срок - менее чем за месяц - он подготовил первую, самую существенную часть своей работы *«О строении атомов и молекул»*.

До Бора обобщенную формулу Бальмера и связанный с ней комбинационный принцип Ритца многие рассматривали как *«забавную игру чисел»*. Бор впервые открыл глубинный физический смысл этой формулы, «увидев» в ней, как «рождаются» кванты излучающего атома. Он понял, что частота спектральной линии атома связана не с частотой обращения электронов вокруг ядра, как этого требовали классические представления, а с энергией излучения, возникающего при переходе атома из одного своего дискретного состояния в другое. Действительно, если умножить левую и правую части обобщенной формулы Бальмера на постоянную Планка

$$h\nu = hR/m^2 - hR/n^2$$

то видно, что левая часть этой формулы представляет квант энергии излучения частоты ν , а в правой части стоит разность двух членов, каждый из которых также должен иметь размерность энергии. Что это за энергия? Естественнo предположить, что эти два члена представляют собой энергию атома *до* и *после* излучения фотона, так что написанная формула есть не что иное, как закон сохранения энергии. В самом деле, если принять, что $E_n = -hR/n^2$ – энергия атома до излучения, а $E_m = -hR/m^2$ – его энергия после излучения, то энергия испущенного атомом фотона равна $h\nu = E_n - E_m$. Отсюда становятся понятными знаменитые квантовые постулаты Бора, которые совместили факт существования атомов с дискретным характером их спектров:

1. Существуют *стационарные* (не зависящие от времени) *состояния*, находясь в которых атомы не испускают и не поглощают энергию. Эти состояния характеризуются дискретным набором значений энергии E_1, E_2, E_3, \dots .

2. Испускание и поглощение излучения происходит при скачкообразном переходе атома из одного его дискретного состояния в другое, при этом энергия испущенного или поглощенного кванта определяется уравнением $h\nu = E_n - E_m$.

Прерывистость излучения была столь шокирующей в рамках классической электродинамики, что несмотря на разъяснения Бора своих постулатов Макс фон Лауэ

в то время возмущенно говорил: *«Это вздор! Уравнения Максвелла действительны во всех обстоятельствах, и электрон должен излучать непрерывно»*.

Первый постулат представляет собой, собственно, признание факта, что атомы в природе существуют. Но для этого необходимо, по Бору, считать, что атом может находиться лишь в состояниях с дискретными значениями энергии, и электроны в атомах обращаются вокруг ядра на определенных дискретных расстояниях. Находясь на минимальном расстоянии от ядра, электрон больше не может никуда «перескочить», так что он должен находиться в этом состоянии бесконечно долго. Так объясняется устойчивость атомов. Второй постулат опирается на квантовую гипотезу Планка и является обобщением опытных результатов о спектральных линиях излучающего атома. Глубинный смысл этого постулата заметил Резерфорд. Он писал Бору: *«Мне кажется, Вы будете вынуждены допустить, что электрон заранее знает, где ему остановиться»*. Действительно, частота испускаемого кванта не может измениться «по дороге», и получается, что у электрона, совершающего скачок в атоме, возникает «свобода выбора». Понимание этой проблемы, которая полностью решена современной квантовой теорией, стало возможным после того, как Эйнштейн в 1916 г. в работе *«К квантовой теории излучения»* ввел понятие вероятности переходов между дискретными состояниями атомов. Например, в спектре атомов натрия характерной является желтая линия. Это значит, что «желтый» скачок для атомов натрия является наиболее вероятным.

Вводя гипотезу о скачках, Бор тем самым впервые использовал ненаглядные представления в физике. Дело в том, что поведение электрона во времени при скачкообразном, т.е. мгновенном переходе из одного состояния в другое, совершенно невозможно представить. В то же время в пространстве такой скачок изображается, по Бору, как переход из одного состояния в другое. Проблема скачкообразных переходов еще долго волновала умы физиков. Вместе с тем надо сказать, что по современным квантовым представлениям наглядное изображение круговых или эллиптических орбит электронов в атоме является некорректным, потому что никаких траекторий электронов в атоме не существует.

Постулаты Бора резко противоречат представлениям классической физики, но именно отказ от этих представлений и введение идеи квантов в мир атома позволило Бору построить первую квантовую теорию атома.

Постулаты Бора были непосредственно доказаны в 1914г. в опытах немецких физиков Джеймса Франка (1882-1964) и Густава Герца (1887-1975).

Первую попытку построить квантовую теорию атома водорода предпринял в 1910г. молодой в то время австрийский физик Артур Гааз (1884-1941). Основываясь на томсоновской модели атома и квантовых представлениях, он вычислил постоянную Ридберга, численное значение которой, однако, во много раз отличалось от экспериментального значения. Идеи Гааза в то время были подняты на смех за «наивную попытку» сочетать между собой столь «несовместимые вещи», как спектроскопия и квантовая теория излучения.

Бор исходил из планетарной модели атома водорода и атомов -ионов с одним электроном, которые называются *водородоподобными*. В соответствии с планетарной моделью Бор в своей работе рассматривал электрон, который движется со скоростью, намного меньшей скорости света, по замкнутой траектории вокруг ядра. 20,

Затем Бор предположил, что орбита, о которой идет речь, круговая, и использовал идею Планка о том, что количество энергии, испускаемой при каждом акте излучения, равно $h\nu$. Дальнейшие рассуждения Бора подтверждают гениальность хода его мыслей и поразительную физическую интуицию. Он предположил, что электрон вначале находится очень далеко от ядра и не обладает относительно него заметной скоростью и что при подходе к ядру электрон попадает на стационарную орбиту вокруг ядра.

По мере увеличения энергии (увеличения числа n) разность между соседними уровнями энергии становится столь незначительной, что можно говорить о почти непрерывном изменении энергии. Но непрерывное изменение физических величин характерно для классической физики. Таким образом, при достаточно больших значениях числа n , которое Бор назвал *главным квантовым числом*, результаты квантовой теории должны совпадать с результатами, полученными на основе классических представлений. В этом заключается *принцип соответствия*, впервые сформулированный Бором в 1918г. в работе «О квантовой теории линейчатых спектров».

За исследования строения атома Нильсу Бору в 1922г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Теория Бора сразу же получила высокую оценку выдающихся физиков того времени - Эйнштейна, Лоренца, Планка, Резерфорда, Джинса, а Зоммерфельд активно включился в развитие теории.

Теория Бора совместно с принципом соответствия позволила разобраться в огромном количестве экспериментальных фактов, объяснить многочисленные явления, и она по праву считалась прекрасной теорией своего времени. Оценивая теорию Бора, Резерфорд в 1931 г. говорил: «Я считаю первоначальную квантовую теорию спектров, выдвинутую Бором, одной из самых революционных из всех когда-либо созданных в науке, и я не знаю другой теории, которая имела бы больший успех». Так же высоко оценивал теорию Бора Эйнштейн: «...Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору - человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем - найти главные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это мне кажется чудом и теперь. Это - наивысшая музыкальность в области мысли».

Тем не менее, несмотря на непосредственное экспериментальное подтверждение постулатов Бора и успехов его теории в объяснении многочисленных экспериментальных фактов, в период с 1919 по 1925 г. стали все яснее проявляться трудности и недостатки этой теории. Теория описывала главные свойства

атомов, но смысл правил квантования оставался загадочным. Не зря Бор называл их постулатами, т.е. недоказанными предположениями. Их смысл стал ясен только после создания последовательной квантовой механики. Теория Бора оказалась фактически лишь теорией атома водорода и водородоподобных атомов. Попытки обобщения теории на случай даже следующего атома в периодической системе - атома гелия - ни к чему положительному не привели. Кроме того, по теории Бора можно было вычислить далеко не все физические величины. Даже в случае атома водорода можно было рассчитать частоты (или длины волн) спектральных линий, и не существовало общего принципа вычисления яркости или интенсивности этих линий. Для этой цели вводились дополнительные предположения, основанные на принципе соответствия - этой «волшебной палочки», как говорил Зоммерфельд.

Период с 1919 по 1925 г. называли периодом «систематического угадывания» на основе принципа соответствия. В 1924 г. Зоммерфельд пророчески писал: *«С помощью своего принципа соответствия Бор пытается тесно увязать квантовую теорию с классической теорией излучения. Он действует по возможности индуктивно и на основе физических соображений, сопоставляя постепенно каждому квантовому числу период некоторого движения. Волшебная сила принципа соответствия полностью оправдалась при выводе правил отбора квантовых чисел, при рассмотрении сериальных и полосатых спектров. Принцип стал путеводной нитью для всех новых открытий Бора и его школы. Несмотря на это, я не могу считать его окончательно удовлетворительным уже из-за того, что в нем смешаны классические и квантовые точки зрения. Мне хотелось бы увидеть принцип соответствия как особо важное следствие будущей дополненной квантовой теории, а не как ее основанием. Это было сказано буквально накануне создания квантовой механики!*

По существу теория Бора еще не была настоящей теорией, а фактически представляла собой набор постулатов, которые сочетали в себе явно непримиримое – классическую непрерывность (вращение на орбитах) и квантовые скачки. К тому времени появились новые экспериментальные факты, которые никак не могла объяснить теория Бора. Нужны были новые идеи, новые представления. Такие идеи были вскоре высказаны и разработаны де Бройлем, Гейзенбергом, Паули, Дираком, Шредингером, Борном, Иорданом, Бором, благодаря которым была создана современная квантовая теория. Эта теория является основой физики атомов и молекул.

Открытия, предшествовавшие созданию квантовой механики

Многие удивительные свойства атомов были открыты при исследовании их поведения в магнитном поле. В 1896 г. нидерландский физик Питер Зееман (1865-1943) впервые обнаружил, что в магнитном поле две *D*-линии излучающего атома натрия «отчетливо уширились».

На основании проведенных экспериментов Зееман пришел к выводу: *«представляется весьма вероятным, что период натриевого излучения изменяется в*

магнитном поле». Зееман сообщил Лоренцу о своих результатах до их опубликования, и Лоренц тут же дал им объяснение на основе электронной теории. (Удивительно, что в то время еще оспаривалось само существование атомов, а Лоренц (и большинство физиков) уже не сомневался в том, что атом имеет структуру!) Лоренц разложил движение квазиупруго связанной заряженной частицы в атоме на линейное колебание, происходящее в направлении магнитного поля, и два круговых движения, происходящих в противоположных направлениях в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Используя эти соображения, Лоренц предсказал, что излучение от краев уширенной линии при наблюдении в продольном направлении должно быть поляризовано по кругу, а в поперечном направлении - линейно поляризовано. Этот вывод Зееман немедленно подтвердил с помощью четвертьволновой пластинки и анализатора. При объяснении эффекта Зеемана Лоренц исходил из уравнения равновесия вращающегося в атоме электрона, совершающего малые колебания и испытывающего действие силы Лоренца в магнитном поле с напряженностью H . : $m\omega^2 / \epsilon = I\epsilon\omega + (e/c)uH$, где ϵ - коэффициент квазиупругости.

Считая, что $I\epsilon = 4\pi e^2 \text{ сти/д}^2$ и $v = 2\pi u$, для частоты двух круговых движений он получил формулу: $\omega = \omega_0 \pm eH/4\pi mc$. Вскоре после объяснения Лоренца выяснилось, что его результат является частным случаем теоремы английского физика Джозефа Лармора. Согласно этой теореме, которая была доказана в 1897г., влияние магнитного поля на вращающиеся заряженные частицы состоит в том, что на их орбитальное движение накладывается прецессия вокруг направления магнитного поля с угловой частотой $\omega^{\wedge} = eH/2mc$. Эту частоту называют *ларморовской частотой*. Таким образом, Лоренц показал, что при наблюдении поперек магнитного поля линия излучения атома с частотой ω_0 расщепляется на три линии с частотами $\omega_0 - \omega_L$, ω_0 , $\omega_0 + \omega_L$. Эти линии получили название *лоренцевский триплет*. При наблюдении вдоль магнитного поля возникает дублет - средняя линия отсутствует. Наблюдаемые линии излучения в продольном и поперечном направлениях имеют разную поляризацию. Триплетные линии поляризованы линейно. Смещенные линии дублета имеют круговую поляризацию в противоположных направлениях. Интересно, что вначале Зееман ошибся в определении направления круговой поляризации в компонентах дублета и поэтому сделал неправильный вывод о том, что подвижные частицы в атоме заряжены положительно.

Однако, как показал опыт, триплетное (или дублетное) расщепление спектральных линий наблюдается далеко не всегда. Чаше возникает более сложная картина расщепления, связанная с *аномальным*, или *сложным эффектом Зеемана*. Начиная с 1898 г. многочисленные попытки объяснения этого эффекта были безуспешными, пока не был открыт спин электрона.

В 1902 г. Зееману и Лоренцу была присуждена Нобелевская премия за исследования влияния магнетизма на процессы излучения.

Пользуясь картиной пространственного квантования и теоремой Лармора о прецессии магнитного момента вокруг внешнего магнитного поля, Зоммерфельд, а

также Дебай в 1916 г. дали объяснение эффекта Зеемана с квантовой точки зрения. Однако оказалось, что квантовый расчет Зоммерфельда и Дебая не объясняет сложного эффекта Зеемана и приводит лишь к простой картине расщепления, как и в классических расчетах Лоренца. А аномальный Зееман-эффект еще немало будоражил умы физиков того времени.

Тщательные исследования эффекта Зеемана проводили немецкие физики-экспериментаторы Фридрих Пашен (1865-1947) и Эрнст Бак (1881-1959). Они показали, что расщепление спектральных линий всегда пропорционально напряженности магнитного поля, оно имеет различный характер для синглетов, дублетов, триплетов и т.д. и зависит от того, является ли магнитное поле сильным или слабым. В слабом магнитном поле синглетные термы всегда дают лоренцевский триплет, а дублетные, триплетные и т.д. термы приводят к более сложной картине расщепления. С увеличением магнитного поля расщепленные линии вначале диффузно расплываются, а затем при достижении определенного значения магнитного поля, характерного для каждого элемента, они превращаются в обычный триплет Лоренца независимо от мультиплетности термов. Это явление, открытое Пашеном и Баком в 1912г., называют *магнитооптическим превращением*, или *эффектом Пашена-Бака*. По современным представлениям магнитное поле считается «слабым», если вызванное им расщепление мало по сравнению с естественным мультиплетным расщеплением термов; в противном случае магнитное поле является «сильным». Лишь в сильном магнитном поле происходит «нормальное» зеемановское расщепление спектральных линий.

Все особенности эффекта Зеемана были объяснены лишь после введения спина электрона. А до этого многие физики «ломали голову» над проблемой аномального эффекта Зеемана. Чрезвычайно важными оказались опыты немецких физиков Отто Штерна (1888-1969) и Вальтера Герлаха (1889-1979), выполненные в 1921-1922 гг. Их результаты в свое время Зоммерфельд рассматривал как непосредственное экспериментальное доказательство пространственной ориентации магнитного момента, который пропорционален моменту импульса. Штерн и Герлах пропускали пучок атомов серебра перпендикулярно сильно неоднородному магнитному полю. При классическом подходе следовало бы ожидать, что проекции магнитного момента (и момента импульса) этих атомов на направление магнитного поля непрерывно изменяются в пределах от минимального до максимального значения. Опыты показали, что проекции момента импульса атомов серебра имеют дискретные значения, конкретно два значения. По этому поводу Штерн и Герлах писали: *«Мы видим в этих результатах прямое экспериментальное доказательство квантования направления в магнитном поле»*. Они основывались на теории Зоммерфельда, согласно которой в основном состоянии атома серебра число проекций момента импульса на выделенную ось должно быть равно двум. Это, казалось бы, и подтверждается опытами Штерна и Герлаха. В связи с этим Зоммерфельд писал: *«Своим смелым экспериментом Штерн и Герлах не только продемонстрировали существование пространственного квантования, они доказали атомистическую при-*

роду магнитного момента, его квантово-теоретическое происхождение и его связь с атомистической структурой электричества». Однако впоследствии выяснилось, что такое понимание результатов опытов Штерна и Герлаха в действительности является ошибочным, поскольку выводы теории Зоммерфельда о проекциях момента импульса были неправильными. На это впервые указали Эйнштейн и Эренфест в 1922 г.

Это служит наглядным примером того, как иногда благодаря случайности эксперимент может подтверждать неправильные теоретические положения. Случайным в опытах Штерна и Герлаха был выбор атомов серебра. Если бы они взяли другое вещество, например, серу, то никакого согласия с теорией Зоммерфельда не было бы. Наблюдающееся же на опыте расщепление означало, что оно обусловлено не орбитальным движением электронов, а какими-то другими причинами. При правильном истолковании своими опытами Штерн и Герлах открыли новую важную характеристику электрона - его *спин*. Однако представление о спине электрона возникло не сразу.

Для объяснения тонкой структуры спектральных линий Зоммерфельд ввел в 1920 г. третье квантовое число j , которое он назвал *внутренним квантовым числом*. Зоммерфельд предположил, что полный момент импульса атома является векторной суммой орбитального момента импульса электрона и момента импульса *атомного остова* (ядра атома).

Однако, как показал выдающийся немецкий физик Вольфганг Паули (1900-1958), предположение о том, атомный остов обладает моментом импульса s , находится в противоречии с тем, что наблюдается для эффекта Зеемана – иначе эффект должен был бы зависеть от атомного номера элемента. Паули предположил, что момент импульса \vec{s} связан с новым квантово-теоретическим свойством электрона, которое Паули называл «двузначностью, не описываемой классически». Он поразительно близко подошел к открытию спина электрона, но так и не сделал решающего определенного шага в этом направлении. Паули приписал квантовое число s самому оптическому электрону. Таким образом, согласно Паули, состояния электрона должны характеризоваться четырьмя квантовыми числами: главным квантовым числом n , орбитальным квантовым числом l , внутренним квантовым числом j и магнитным квантовым числом m_j , принимающим $2j+1$ значений от $-j$ до $+j$.

В 1924 г., когда Паули показал несостоятельность общепринятой в то время теории остова, была опубликована классическая статья английского физика Стонера (1899-1968) «*Распределение электронов по атомным уровням*». В ней было высказано следующее существенное замечание: при заданной величине главного квантового числа число энергетических уровней отдельного электрона в спектрах щелочных металлов во внешнем магнитном поле равно числу электронов в замкнутой оболочке инертных газов, соответствующей этому главному квантовому числу. *Это была общая формулировка принципа запрета.*

В 1925 г. молодые в то время голландские физики Джордж Уленбек (1900-1988) и Сэмюэл Гаудсмит (1902-1979) предложили наглядную модель, которая объясняла

наличие собственного магнитного момента электрона его вращением вокруг собственной оси. Предполагая, что электрон имеет форму шара и заряд его равномерно распределен по поверхности, они нашли, что отношение магнитного момента вращающегося электрона к его моменту импульса вдвое больше, чем в случае орбитального движения электрона. Это соответствовало результатам опытов Штерна и Герлаха. Однако такое наглядное истолкование спина электрона является неверным, поскольку простой расчет показывает, что в этом случае скорость частей электрона на его экваторе значительно превышает скорость света. Паули, вероятно, знал этот недостаток модели.

Надо сказать, что идея о собственном вращении электрона была, в общем, не нова. Еще в 1921 г. Артур Комптон осторожно высказывался о возможности собственного вращения электрона, которое он, однако, не связал с особенностями эффекта Зеемана, и эта идея осталась незамеченной. Школа Бора объясняла всю совокупность явлений, связанных с тонкой структурой спектров и расщеплением спектральных линий в магнитном поле, с помощью гипотезы о некотором *«немеханическом натяжении»*, приводящем к раздвоению термов.

Паули в 1925 г. приписал самому электрону четвертое квантовое число, но не указал смысла этой характеристики в модели атома. Уленбек и Гаудсмит сопоставили четырем квантовым числам четыре степени свободы электрона и выдвинули идею о внутреннем моменте количества движения и магнитном моменте, равным одному магнетону Бора. Однако они не раскрыли связи магнетона Бора с орбитальным движением. Лишь после того, как с помощью идей Эйнштейна они вывели формулу для дублетного расщепления с множителем 2 и применили ее к атому водорода, Бор, а за ним и другие, признали гипотезу о спине электрона.

В 1927 г. Паули включил спин электрона в формальный аппарат нерелятивистской квантовой механики. Учет спина электрона проводится в последовательной квантово-релятивистской теории, созданной Дираком в 1928 г.

ИСТОРИЯ АТОМА – ОКОНЧАНИЕ

«Волны материи»

Физики только-только начали осмысливать проблему корпускулярно-волнового дуализма света, как в 1923 г. французский физик Луи де Бройль (1892-1987), что называется, подлил масла в огонь и усугубил эту проблему. Он высказал, казалось, если не сумасшедшую, то довольно странную идею. В сентябре 1923 г. Луи де Бройль в журнале опубликовал результаты своих исследований, которые в дальнейшем привели к построению современной квантовой теории. Полностью восприняв идею Эйнштейна о корпускулярно-волновом дуализме света, Луи де Бройль пришел к мысли, что частицы, например электроны, аналогично квантам света, обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Такая мысль могла возникнуть при глубоком анализе известной оптико-механической аналогии. Она заключается в том, что уравнения движения материальной частицы в форме Гамильтона-Якоби совершенно аналогичны уравнениям распространения луча света без учета его волновых свойств. Это доказал еще в 1834 г. Гамильтон. В своей первой работе де Бройль писал: *«История оптических теорий показывает, что научные взгляды долгое время колебались между механической и волновой концепцией света, однако эти две точки зрения, вероятно, менее противоречат одна другой, чем думали ранее»*. Квант света - фотон отличается от других частиц, например электронов, только тем, что его масса равна нулю. Но это различие вряд ли является принципиальным. Поэтому де Бройль пришел к мысли, что корпускулярно-волновой дуализм - не исключительное свойство света, а общее свойство материи. Свои размышления по этому поводу он изложил следующим образом: *«Соотношение Эйнштейна между частотой и энергией, введенное им на основе его теории фотонов, ясно показало, что этот дуализм излучения неразрывно связан с самим существованием квантов. Тогда возникает законный вопрос, не связан ли этот странный дуализм волн и частиц, примером которого так замечательно и несомненно явился свет, с глубокой и скрытой природой кванта действия? Не следует ли ожидать, что двойственность такого типа обнаружится всегда, где только появляется постоянная Планка? Но тогда почти сам собой возникает вопрос: поскольку свойства электрона в стационарном состоянии атома описываются с помощью кванта действия, не можем ли мы предположить, что и электрон так же двойственен, как и свет? На первый взгляд, такая идея показалась очень дерзкой. Ведь мы всегда представляли себе электрон в виде электрически заряженной материальной точки, которая подчиняется законам классической динамики (улучшенным в некоторых случаях релятивистскими поправками, которые ввел Эйнштейн). Электрон никогда явно не*

проявлял волновых свойств, таких, скажем, какие проявляет свет в явлениях интерференции и дифракции. Попытка приписать волновые свойства электрону, когда этому нет никаких экспериментальных доказательств, могла выглядеть как ненаучная фантазия. И тем не менее, как только возникла идея, что электрон, возможно, обладает такими свойствами, и не только электрон, но и вообще материальные частицы, так в голову начали приходить разные беспокойные соображения».

Свою идею де Бройль обосновал так: частице с массой m_0 , неподвижной в сопутствующей системе отсчета, де Бройль приписал некий колебательный в пространстве процесс вида $\psi = A \sin 2\pi \nu_0 t$, где частота ν_0 определяется из условия, что энергия покоя частицы равна энергии кванта этого процесса: $mc^2 = h\nu_0$. Используя положения теории относительности он указал, что наблюдатель, относительно которого частица движется с постоянной скоростью вдоль оси x' , будет воспринимать ее как «фиктивную волну, связанную с движущимся телом».

Таким образом, де Бройль пришел к выводу: «что, быть может, каждое движущееся тело сопровождается волной и что невозможно разделить движение тела и распространение волны». Каждой движущейся частице с импульсом p сопоставляется волна, длина волны которой определяется формулой $\lambda = h/p$. Эта формула явно отражает корпускулярно-волновой дуализм. В самом деле, длина волны является волновой характеристикой, а импульс - характеристикой частицы. Так что волновому процессу с длиной волны λ отвечает частица с импульсом p , и, наоборот, частице с импульсом p отвечает волна с длиной волны λ . Волновые свойства движущейся частицы описываются с помощью волновой функции ψ .

Идея де Бройля о волнах материи позволила разъяснить смысл условия квантования Бора. Таким образом, де Бройль открыл неожиданно простой смысл условия боровского квантования орбит: на длине n -ой орбиты должно укладываться целое число длин волн де Бройля. Это значит, что на боровской окружности волна де Бройля замыкается сама на себя. По этому поводу физики в то время со смехом говорили, что, по де Бройлю, электрон на боровской орбите «сам себя ловит за хвост».

Эйнштейн сразу поддержал работу де Бройля, считая, что она «заслуживает всяческого внимания». Идеи де Бройля воспринял также Бор, который стал самым последовательным приверженцем идеи корпускулярно-волнового дуализма. Среди тех, кто с самого начала поддержал идеи де Бройля, был Ланжевен. Вместе с тем, конечно, не все физики того времени воспринимали идею де Бройля о волнах материи. Среди них был Планк, а Лоренц отреагировал так: «Эти молодые люди считают, что отбрасывать старые понятия в физике чрезвычайно легко!». Историки науки, например, Ф. Хунд, задаются вопросом: «почему корпускулярно-волновой дуализм так поздно был распространен на вещество?» Ведь идею о корпускулярно-волновом дуализме света Эйнштейн выдвинул еще в 1905 г.! Мы видели, как относились физики к этой гипотезе в течение длительного времени, а Эйнштейн, видимо поглощенный

создаваемой им теорией тяготения, не догадался обобщить соотношения для фотонов на волны вещества. Но если бы он и высказал эти идеи в то время, то, можно не сомневаться, это привело бы к еще большему их отторжению.

Высказанные де Бройлем идеи явились плодом его теоретических исканий и не были связаны с каким-либо экспериментом. Однако сам де Бройль глубоко верил в их справедливость и даже предполагал, как это может быть доказано. После того как идея де Бройля была опубликована и стала известна физикам были предприняты попытки обнаружить дифракцию электронов. В результате экспериментов Дэвиссона (1881-1958), Кансмана, Джеймса Франка (1882-1964) и Вальтера Эльзассера возникли прямые подтверждения волновой природы электрона. Однако эти эксперименты можно было объяснять по-разному. Только проведенные в 1927 г. опыты Дэвиссона полностью подтвердили гипотезу де Бройля о существовании волновых свойств у электронов.

За открытие дифракции электронов на кристаллах Дэвиссон и Томсон в 1937 г. получили Нобелевскую премию.

Значительно позже Макс Борн писал: *«Замечателен исторический факт, что сыну человека, который установил корпускулярную природу катодных лучей, выпала судьба показать их волновую природу»*. Парадоксальность гипотезы де Бройля, подтвержденной опытами Дэвиссона и Томсона, красноречиво отмечал Шредингер в 1928 г.: *«Некоторые исследователи (Дэвиссон и Джермер и молодой Дж.П. Томсон) приступили к выполнению опыта, за который еще несколько лет назад их бы поместили в психиатрическую больницу для наблюдения за их душевным состоянием. Но они добились полного успеха»*.

Идеи де Бройля и блестящие эксперименты Дэвиссона и Джермера и Томсона внесли сумятицу в умы физиков. До этого никто не сомневался в корпускулярной природе электронов, т.е. в их сущности как частиц. Теперь оказалось, что они обнаруживают интерференционные явления, как если бы они были волнами с длиной волны, определяемой формулой де Бройля. По этому поводу Уильям Генри Брэгг шутливо говорил так: *следовало полагать, что по понедельникам, средам и пятницам электроны являются волнами, по вторникам, четвергам и субботам - частицами, а по воскресеньям они отдыхают*. Что называется, подливал масла в огонь и сам Дэвиссон, который в своей статье в 1928 *«Существуют ли электронные волны?»*, писал: *«Это в высшей степени парадоксально и способно привести в замешательство. Мы должны поверить не только в то, что в определенном смысле кролики суть кошки, но также и в том, что в некоем смысле кошки суть кролики»*. Эта проблема стала предметом острых дискуссий в физике, о чем будет говориться дальше.

Помимо рассмотренных выше классических экспериментов по дифракции электронов в дальнейшем были выполнены также опыты, являющиеся аналогами известных опытов по дифракции света. Позднее интерференционные и дифракционные явления были открыты не только для электронов, но и для других

«частиц» – нейтронов, протонов, α -частиц и даже молекул. В настоящее время на основе опытов с интерференцией электронов и нейтронов развились новые мощные методы исследования кристаллов - электронография и нейтронография. Эти методы не только не уступают методу рентгенографического анализа, но и в ряде случаев оказываются более удобными и более точными.

Волновыми свойствами, согласно де Бройлю, обладают все материальные тела. Однако для макроскопических тел длина волны де Бройля настолько мала, что говорить об их волновых свойствах не имеет смысла. Например, для Земли ($m = 5 \cdot 10^{27}$ г) при ее обращении вокруг Солнца со скоростью $3 \cdot 10^6$ см/с длина волны де Бройля равна $4 \cdot 10^{-61}$ см.

Таким образом, многочисленные эксперименты подтвердили справедливость гипотезы Луи де Бройля о том, что корпускулярно-волновой дуализм является общим свойством материи. Это означало, что классическая физика, противопоставляющая частицы и волны, не может описывать явления микромира. Назрела необходимость создания новой механики микромира, которую Макс Борн в 1924 г. назвал *квантовой механикой*.

За открытие волновых свойств электрона Луи де Бройлю в 1929 г. была присуждена Нобелевская премия.

«Физика мальчишек»

Термин «квантовая механика» впервые появился в заголовке статьи Макса Борна в 1924 г. Почти тождественный термин «механика квантов» ввел Лоренц в своем докладе «*Старая и новая механика*» в конце 1923 г.

Современная квантовая механика была создана за сравнительно короткое время в период с 1925 по 1927 г. Это был период коренной ломки устоявшихся понятий и представлений. Для этого периода была характерна, по образному выражению Эйнштейна, «*драма идей*». Новые идеи возникали в результате научного озарения гениальных умов. Удивительно, что новые результаты были получены раньше, чем становился понятным их смысл. Первый прорыв на пути создания квантовой механики сделал немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901-1976) летом 1925г.

Свои догадки Гейзенберг изложил в первой статье «*О новом квантово-механическом толковании кинематических и механических соотношений*», которая поступила в редакцию журнала 29 июля 1925 г. Этот день считается *днем рождения современной квантовой теории*. За свою работу Гейзенберг был удостоен Нобелевской премии в 1932 г.

В этой работе Гейзенберг представил первый вариант квантовой механики в так называемой *матричной форме*.

Гейзенберг полагал, что в теории должны содержаться только наблюдаемые величины, такие как испускаемые и поглощаемые кванты, частота и амплитуда «чего-то» колеблющегося в атоме. Частота проявляется в цвете спектральных линий,

амплитуда - в их яркости, интенсивности. Знание частот, согласно комбинационному принципу, дает возможность определить «энергетическую лестницу» в атоме. Если известны амплитуды, то можно, по идее Эйнштейна, вычислить вероятности квантовых переходов - скачков. Такой подход, по замыслу Гейзенберга, устраняет непоследовательность теории Бора - движение электрона по воображаемым орбитам.

Для того чтобы найти соотношения между наблюдаемыми величинами, Гейзенберг придумал, как он считал, новый математический аппарат. В теории Гейзенберга каждая наблюдаемая физическая величина характеризуется двумя числами, которые определяют начальное и конечное состояния системы. Например, координате x соответствует совокупность *матричных элементов* x_{nm} , где числа n, m характеризуют начальное и конечное состояния. Гейзенберг получил замкнутую систему уравнений для наблюдаемых величин и рассмотрел конкретную модельную задачу - гармонический осциллятор. Своим матричным методом он нашел энергетический спектр осциллятора, содержащий *нулевую энергию*, и рассчитал вероятности переходов между различными уровнями энергии. Надо сказать, что за полгода до публикации статьи Гейзенберга существование нулевой энергии было надежно установлено в экспериментах американского физико-химика Роберта Малликена (1896-1986).

На основе своего анализа Гейзенберг впервые пришел также к потрясающему в то время заключению: в теории, согласованной с комбинационным принципом Ритца, не может быть классического понятия о траектории электрона внутри атома. Это было первым шагом на пути открытия соотношений неопределенности.

Вольфганг Паули, ровесник и друг Гейзенберга, считал, что новые идеи в физике и вообще новая квантовая механика являются уделом «мальчишек», каким он в то время был сам, а также Гейзенберг, Иордан, Дирак. Поэтому он восторженно встретил идеи Гейзенберга, говоря в июле 1925 г., что это была *«утренняя заря, начало рассвета квантовой теории»*. Одним из первых ознакомился со статьей Гейзенберга и Макс Борн, входивший в число тех, кто «делал» новую квантовую физику. По сравнению с «мальчишками» Борн был уже «стариком». Макс Борн был, как он впоследствии вспоминал, *«совершенно очарован»* работой Гейзенберга. Вместе с тем он заметил: *«Каким талантливым невеждой надо было быть, чтобы не знать существующего математического аппарата и самому изобрести его, раз он тебе понадобился»*. Дело в том, что математический аппарат, который «изобрел» Гейзенберг, в то время был уже хорошо разработан. Это была математическая теория матриц, которую, как оказалось, он совершенно не знал. Когда Борн рассказал Паули о матрицах, которые фактически использовал Гейзенберг, Паули саркастически заметил: *«Да, я знаю, что вам нравится скучный и сложный формализм. Вы только испортите физические идеи Гейзенберга своей пустяковой математикой»*.

К октябрю 1925г. Гейзенберг, Борн и Паскуаль Иордан (1902-1980) завершили построение матричной механики, доведя ее с «геттингенской ученостью» до полного совершенства. Они ввели понятие канонических преобразований, т.е. таких

преобразований, которые сохраняли перестановочные соотношения. Их статья была опубликована в январе 1926 г.

Идеи Гейзенберга развил и представил в другой математической, но эквивалентной форме английский физик Поль Дирак. *Дирак - один из создателей квантовой механики.* В 1927г. он впервые проквантовал электромагнитное поле, заложив тем самым основы квантовой электродинамики. В 1928 г. он создал квантовую релятивистскую теорию движения электрона. Предсказал существование позитрона. Он ввел множество символов и обозначений, которые широко используются в современной физике. За открытие новых форм атомной теории совместно с Шредингером он был удостоен Нобелевской премии в 1933 г.

В ноябре 1925 г. Дирак опубликовал знаменитую статью *«Основные уравнения квантовой механики»*.

Далее, не используя явно матричное исчисление, он получил все основные результаты Гейзенберга, Борна и Иордана. В следующей работе Дирак применил свою теорию для расчета атома водорода и подтвердил известные результаты теории Бора. Этими работами было завершено построение матричной версии новой квантовой теории.

Сам Гейзенберг был удручен тем, что ему не удалось решить своим методом проблему атома водорода. Находясь в состоянии раздражения от постоянной критики Паули матричного метода, Гейзенберг как-то написал ему: *«Твои постоянные оскорбления Копенгагена и Геттингена - ужасный позор. Ты вынужден будешь признать, что, во всяком случае, мы не собираемся разрушить физику из злостных намерений. Когда ты бранишь нас, что мы такие ослы, что не придумали ничего физически нового, то это вполне может быть правдой. Но тогда ты такой же болван, потому что ты тоже не даешь нового'»*. Эти слова, по-видимому, глубоко задели Паули и он, несмотря на свою критику матричного формализма, почти одновременно с Дираком решил задачу об атоме водорода матричным методом. По этому поводу Гейзенберг спустя много лет вспоминал: *«Уже в октябре того же 1925 года Паули преподнес мне сюрприз - законченную матричную механику атома водорода. Мой ответ от 3 ноября начинался словами: «Едва ли нужно писать, как сильно я радуюсь новой теории водорода и насколько велико мое удивление, что ты смог так быстро ее разработать»»*.

Так постулаты Бора наконец-то получили квантово-механическое обоснование. Вместе с тем, матричная квантовая механика была довольно сложной и обходила стороной ждущую своего решения проблему корпускулярно-волнового дуализма. Впрочем, следует помнить, что к тому времени еще не было экспериментального подтверждения гипотезы де Бройля. Кроме того, исключение из теории всех ненаблюдаемых величин не является таким уж безобидным делом. Это впоследствии отмечал Гейзенберг: *((Эйнштейн обратил мое внимание на то, что утверждать, будто следует говорить только о наблюдаемых величинах, даже опасно. Потому что каждая разумная теория, кроме непосредственно наблюдаемых, должна давать*

возможность наблюдать и нечто более опосредованное. Мах, например, был убежден, что понятие атома было принято только из-за его удобства, в целях экономии мышления, он не верил в реальность атомов. В наше время каждый сказал бы, что это нонсенс; совершенно ясно, что атомы существуют». Это же отмечал и Макс Борн, говоря о принципе, используемом Гейзенбергом: «(...если под этим принципом разуметь (как это делают многие) исключение из теории всех ненаблюдаемых величин, то это ведет к бессмыслице. Например, волновая функция Шредингера у является такой ненаблюдаемой величиной, но, конечно, она позднее была принята Гейзенбергом как полезное понятие. Он установил не догматический, а эвристический принцип. Он обнаружил с помощью научной интуиции неадекватные понятия, которые должны быть исключены».

Бор высоко оценил работу Гейзенберга и рассматривал ее как развитие принципа соответствия. Хотя механика Гейзенберга отпугивала физиков, склонных к эксперименту, но вместе с тем, она будила мысли теоретиков. В августе 1925 г., всего несколько недель спустя после выхода статьи Гейзенберга, Бор, отмечая ее как выдающееся достижение, прозорливо говорил: «...этот глубокий подход к проблемам квантовой теории предъявляет большие требования к нашей способности абстрактного мышления... Будем надеяться, что началась новая эра взаимного стимулирования механики и математики». Как и предсказывал Бор, дальнейшее развитие квантовой теории стало возможным лишь при взаимном стимулировании физики и математики. Очень плодотворным оказалось сотрудничество Макса Борна и американского математика Норберта Винера. Они ввели линейные операторы в квантовую механику. По воспоминаниям Винера, «Когда профессор Борн приехал в Соединенные Штаты, его крайне занимала новая основа, которую только что предложил Гейзенберг для квантовой теории атома... Борн стремился к теории, которая обобщила бы эти матрицы... Работа эта носила в высшей степени специальный характер, и он рассчитывал на мою помощь... У меня уже было готово обобщение матриц в форме так называемых операторов. У Борна была масса сомнений в основательности моего метода, и его мучил вопрос, одобрит ли Гильберт мою математику. В действительности Гильберт ее одобрил, и с тех пор операторы остаются неотъемлемой частью квантовой теории». Решив задачи о квантовом осцилляторе и одномерном равномерном движении, они показали возможность использования новой операторной техники как для периодических, так и непериодических явлений. Вместе с тем, вводя операторы в квантовой механике, они упустили возможность открытия волновой механики раньше Шредингера.

Волновая механика

Дальнейшее существенное развитие квантовой теории связано с именем Шредингера. Он был одним из солидных по возрасту создателей квантовой механики - ему в то время было около 40 лет, а другие были «мальчишками»: Паули -25,

Гейзенбергу - 24, Дираку и Иордану - по 23 года. Эрвин Шредингер (1887-1961), будучи физиком классической закалки, надеялся вернуть квантовой механике «здоровый смысл» без квантовых скачков и других особенностей. Осенью 1925 г. Шредингер, неудовлетворенный идеями и аппаратом матричной квантовой механики, раздумывал о построении новой, *волновой механики*. В четырех статьях с января по июнь 1926г. он изложил свою теорию под общим названием «Квантование как проблема собственных значений». Он писал: *«Моя теория была инспирирована работами Луи де Бройля и коротким, но бесконечно дальновидным замечанием Эйнштейна. Я не представляю себе какой бы то ни было генетической связи с Гейзенбергом. Мне, конечно, было известно о его теории, но я чувствовал испуг, если не сказать, отвращение, от методов трансцендентной алгебры, которые казались мне очень трудными, и недостатка наглядности»*.

Как только появилась теория Шредингера, Гейзенберг сильно расстроился и очень надеялся, что эта теория окажется неправильной. Когда в июне 1926 г. Макс Борн использовал метод Шредингера в задаче об атомных столкновениях и дал статистическую интерпретацию волновой функции Шредингера, Гейзенберг осудил его за измену *«самоу духу матричной механики»* и переход *«во вражеский лагерь»*. Гейзенберг писал в то время: *«Чем больше я размышляю о физической стороне теории Шредингера, тем ужаснее она мне кажется»*.

Свою первую статью, посвященную *вариационному выводу волнового уравнения и его применению к атому водорода*, Шредингер начинает словами: *«В этом сообщении я хотел бы на примере простейшего случая атома водорода (в нерелятивистском и невозмущенном случае) показать, что обычные правила квантования могут быть заменены другим условием, в котором нет упоминания о целых числах. Целые числа появляются столь же естественно, как числа узлов колеблющейся струны. Новое представление может быть обобщено и, как я думаю, глубоко связано с сущностью квантовых предписаний»*. Для описания поведения электрона (микрочастицы) не прибегая к матричной квантовой механике Гейзенберга, но учитывая волновые свойства объекта, Шредингер взял за основу уравнения механики в форме Гамильтона-Якоби. Далее он ввел новую функцию ψ -функцию (пси-функцию) с помощью равенства

$$S_0 = K \lg \psi, \text{ где}$$

S_0 - функция укороченного действия, K - постоянная с размерностью действия.

При этом он привел обоснование. *«Мы ищем такие реальные во всем пространстве, однозначные, конечные и дважды непрерывно дифференцируемые функции ψ , которые делают интеграл по всему пространству экстремальным. Это вариационное требование заменяет квантовые условия»*. Затем после несложных преобразований получилось знаменитое уравнение Шредингера

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{r} \right) \psi = 0, \text{ при условии } \int d\mathbf{r} \delta \psi \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{r}} = 0.$$

Под символом ψ в квантовой физике понимают комплекснозначную функцию, называемую волновой функцией, описывающей чистое состояние объекта. В наиболее распространенной копенгагенской интерпретации эта функция связана с вероятностью обнаружения объекта в одном из чистых состояний (квадрат модуля волновой функции представляет собой плотность вероятности). Поведение гамильтоновой системы в чистом состоянии полностью описывается с помощью волновой функции.

Интегрирование ведется по бесконечно удаленной замкнутой поверхности с нормалью n . Так Шредингер пришел к волновому уравнению для стационарных состояний. Второе соотношение имеет значение для исследования поведения несвязанных электронов на «*гиперболических орбитах*». Решение полученного уравнения Шредингер ищет в сферических координатах по методу разделения переменных, рассматривая случаи $E > 0$ (свободный электрон) и $E < 0$ (связанный электрон). Угловая часть волновой функции описывается шаровыми функциями. Решение уравнения для радиальной части волновой функции Шредингер проводит очень громоздким методом. Теперь достаточно простой способ решения излагается во всех курсах квантовой механики. Для связанных состояний он нашел дискретный спектр собственных значений энергии, который, естественно, при $K = h$ совпал с уже давно известным результатом Бора и затем полученным Паули матричным методом, а также Дираком с помощью его некоммутативной алгебры.

Волновые свойства электрона в каждой точке пространства с координатами x, y, z Шредингер описывает с помощью «*волновой функции*» $\psi(x, y, z)$. Поскольку электрон находится где-то внутри атома, то волновая функция, описывающая состояние электрона, должна исчезать на бесконечно большом удалении от ядра. Такое свойство волновой функции называют «естественным граничным условием». Именно это условие приводит к дискретным значениям энергии электрона в атоме: оказывается, что решение уравнения Шредингера для ψ -функции, обращаемой в нуль на бесконечно большом удалении, существует не всегда, а лишь тогда, когда энергия имеет вполне определенные дискретные значения. В случае атома водорода энергетический спектр, по Шредингеру, в точности совпадает с результатом Бора. Так Шредингер показал, что его волновая механика совершенно естественно приводит к правильным результатам с помощью последовательного решения задачи на собственные значения без каких-либо постулатов о квантовании.

Во второй статье 1926 г. Шредингер обсуждал гамильтонову аналогию между классической механикой и геометрической оптикой.

В этой же статье Шредингер применил свое уравнение к некоторым простым системам: линейному гармоническому осциллятору и ротатору (двухатомной молекуле). В следующей статье Шредингер показал, что его волновая механика и матричная механика Гейзенберга приводят к одним и тем же результатам. Он доказал «*формальную, математическую тождественность*» волновой механики и матричной механики. В дальнейшем это было доказано строго в ряде работ других авторов.

В последней своей статье этой серии Шредингер обосновал волновое уравнение для нестационарных состояний и, развив теорию возмущений на этот случай, он рассмотрел теорию дисперсии. Его попытка обобщения волнового уравнения с учетом релятивизма и магнитного поля оказалась unsuccessful.

Гейзенберг считал, что физически реальны лишь частицы, а их волновой характер - математическая маска, при этом в атомном мире должны существовать скачки физических величин. Шредингер же считал, что физически реальны лишь волны, а их корпускулярность - это математическая иллюзия. При этом он не признавал скачков - «*природа не делает скачков*». Шредингер был убежден, что, наконец-то он избежал квантовых скачков и вернул в физику непрерывность, поскольку в его теории рассматривались непрерывные волновые функции.

Шредингер считал, что электрон есть не что иное, как волна, вернее, совокупность различных волн, длины волн которых изменяются непрерывно в небольшом интервале вблизи некоторой «средней» длины волны. Такое волновое образование называют волновым пакетом, который имеет ограниченные размеры в пространстве. А локализация в пространстве - это характерная особенность частиц. Таким образом, область локализации волнового пакета можно отождествить с размерами частицы. Кроме того, групповая скорость волны де Бройля для частицы совпадает со скоростью ее движения. Казалось, что таких аргументов вполне достаточно, чтобы считать электрон (и другие микрочастицы) волновым пакетом.

Однако имеются серьезные возражения против таких аргументов. Все они сводятся к тому, что если бы электрон был волновым пакетом, то он практически мгновенно бы расплылся. Это противоречит многочисленным фактам устойчивого существования электрона (и других микрочастиц). Кроме того, волны обладают тем свойством, что при падении на границу раздела двух сред волна частично отражается, а частично преломляется. В отношении же электрона (и других микрочастиц) нет ни одного эксперимента, в котором бы проявлялась часть электрона. Во всех опытах всегда электрон выступает как целое со своим зарядом, массой, спином. Так же, как целое выступает фотон, например, в фотоэффекте, эффекте Комптона и др. Другими словами, в отличие от волн электрон, фотон и другие элементарные частицы обладают свойством неделимости.

Таким образом, приведенные возражения вынуждают отказаться от представления о том, что электрон (и другие микрочастицы) является волновым пакетом, составленным из плоских волн де Бройля. Корпускулярно-волновая природа микрочастиц диктует вывод, что волна де Бройля является *волной вероятности*. Она определяет вероятность того, что электрон находится в некоторой области пространства вблизи рассматриваемой точки. Вероятное местоположение электрона и описывается волновой, или ψ -функцией. Идею о вероятностном толковании волновой функции выдвинул Макс Борн в 1926 г. в статье «Квантовая механика процессов соударения». Эта идея позволяет сочетать волновые свойства электронов с их свойством неделимости.

Борн исходил из идеи Эйнштейна о том, что волновое поле является некоторым «призрачным полем» для квантов света - фотонов, и предложил считать волны де Бройля, описываемые уравнением Шредингера, некоторым «призрачным», или «ведущим полем» для микрочастиц. Согласно такой точке зрения, физический смысл имеет не сама волновая функция Шредингера, а квадрат ее модуля. Квадрат модуля волновой функции представляет собой вероятность того, что частица (электрон) в момент времени t находится в элементе объема пространства Δv вблизи точки с координатами x, y, z .

Завершая свою статью, Борн писал: *«На основании изложенных выше соображений, я хотел бы отметить, что квантовая механика позволяет сформулировать и решать не только системы в стационарном состоянии, но и процессы перехода. Шредингеровская форма квантовой механики представляется для этого наиболее подходящей; она позволяет сохранить обычные представления о пространстве и времени, в которых события развиваются нормально. В это же время из развитой выше теории не следует казуальной последовательности отдельных микропроцессов. В моем предварительном сообщении я особенно подчеркнул этот индетерминизм, так как он мне кажется соответствующим практике экспериментаторов»*. Борн впоследствии вспоминал: *«Решение этого вопроса не было свободным изобретением разума, а было вынуждено экспериментальными фактами. Статистическая интерпретация дебройлевских волн была внушена мне моим знанием экспериментов по атомным столкновениям... Все развитие квантовой механики пока-зывает, что совокупность наблюдений и измерений медленно создает абстрактные формулы для их сжатого описания и что понимание их значения приходит впоследствии»*.

За вероятностную интерпретацию волновой функции Макс Борну в 1954 г. была присуждена Нобелевская премия.

Нильс Бор, давно проникшийся убеждением, что микромир находится во власти вероятностных закономерностей, высоко оценил идею Борна. Однако далеко не все физики разделяли в то время такое понимание квантовой механики. В их число входили выдающиеся физики, основоположники квантовой теории - де Бройль, Эйнштейн, Шредингер. Они предприняли немало усилий, чтобы дать другую, чисто волновую интерпретацию квантовой механики. Однако эти разработки были безуспешными. Тем не менее, еще долгое время продолжались безуспешные попытки избежать вероятностей в квантовой механике. Многочисленными и трудными были дискуссии Эйнштейна с Нильсом Бором. В конце концов, Эйнштейн убедился в логической непротиворечивости позиции Бора и «копенгагенской» интерпретации квантовой механики.

Были выполнены различные эксперименты, из которых можно сделать вывод, что экспериментальные результаты вполне согласуются с предсказаниями квантовой механики. Таким образом, квантовая механика, возникшая на основе опытных фактов и являющаяся обобщением классической механики, сама непосредственно подтвер-

ждена на опыте. Вместе с тем, утверждать, что квантовая механика незыблема, особенно в области сверхмалых масштабов, значит приходить в противоречие с принципами, которыми руководствовались ее создатели. Интерпретацию квантовой механики, которую отстаивал Бор, называют *копенгагенской интерпретацией*. Помимо этого существуют *другие интерпретации*. Отметим также *третий вариант квантовой механики*, разработанный в 1948г. Фейнманом, на основе представлений об интегрировании по траекториям.

«Парадоксы» квантовой механики

Несмотря на многочисленные разъяснения Бора и несомненные успехи квантовой механики, Эйнштейн не признавал ее как законченную теорию. 15 мая 1935 г. была опубликована знаменитая статья Эйнштейна, Подольского и Розена (ЕРК) с названием «*Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным?*». Проведя анализ поведения системы, состоящей из двух подсистем, которые взаимодействуют лишь в течение определенного промежутка времени, авторы пришли к выводу, что квантово - механическое описание реальности не является полным. Эта работа немедленно подверглась критике Бора в его статье под таким же названием. Опираясь на принцип дополненности, с помощью мысленных экспериментов Бор показал, что выводы ЕРК ошибочны. Среди поддержавших идеи ЕРК., был Шредингер.

До сих пор продолжаются дискуссии, связанные с парадоксами ЕРК. Эти парадоксы стимулировали постановку новых принципиальных вопросов, касающихся самих основ квантовой механики, и привели к рассмотрению так называемых *запутанных квантовых состояний*.

В квантовой механике часто дискутируется вопрос о роли наблюдателя. Наблюдение совершенно невозможно без воздействия на исследуемую квантовую систему и изменения ее состояния. Считалось, что наблюдения и вызываемые ими возмущения приводят к замедлению квантовых процессов. Это утверждение называют *квантовым эффектом Зенона*. В соответствии с этим эффектом распады квантовых состояний (например, спонтанный переход атома на более низкий энергетический уровень) должны затягиваться. Однако последнее время приходят к выводу, что в большинстве случаев наблюдения не замедляют, а ускоряют распады.

В наше время на стыке квантовой механики, теории информации и программирования, дискретной математики, лазерной физики и спектроскопии возникло новое направление в физике - *квантовая информация*. Оно включает в себя вопросы квантовых вычислений, квантовых компьютеров, квантовой телепортации, квантовой криптографии, квантового телеклонирования.

Атомное ядро

Многочисленные опыты по рассеянию α -частиц подтвердили представления Резерфорда о ядерном строении атома и его знаменитую формулу. Вместе с тем согласие теории с экспериментом наблюдалось только в случае рассеяния α -частиц тяжелыми элементами. Рассеяние α -частиц по разным направлениям легкими элементами оказалось отличным от того, что предсказывала теория. В этом случае говорили об «аномальном» рассеянии α -частиц. Объясняли это так: поскольку заряд ядра тяжелых атомов довольно большой, то силы отталкивания между ними и α -частицами очень велики. Эти силы заставляют α -частицы отклоняться от своего пути еще сравнительно далеко от ядра. В случае легких элементов, заряд ядра которых сравнительно невелик, силы отталкивания намного слабее, так что α -частицы могут близко подходить к ядру, и, возможно, даже проникать в него. Такие рассуждения привели Резерфорда к мысли о возможности расщепления атомных ядер с помощью быстрых α -частиц. Прodelав ряд остроумных опытов, Резерфорд пришел к поразительному открытию - при бомбардировке азота быстрыми α -частицами из недр его ядер вылетают ядра атома водорода.

Вначале ядро атома водорода предполагалось называть «*бароном*» (от слова «*барос*» - тяжелый), однако такое название не получило распространения и был найден другой термин «*протон*» («*протос*» - первый, первичный), который сразу же был принят физиками. Выполнив большое число экспериментов, Резерфорд пришел к выводу, что протон входит в состав ядер всех атомов. Таким образом, не атом водорода, как предполагал Праут, а ядро атома водорода является составной частью всех атомов.

Описанные опыты Резерфорда позволяли проследить только поведение протона, а судьба α -частицы и остальной части ядра оставалась неизвестной. Эту часть драмы, связанной с бомбардировкой атомов азота α -частицами, стал изучать в 1925 г. английский физик Патрик Блэккетт (1897-1974). Он исследовал следы («трэки») с помощью камеры Вильсона. Это была очень трудоемкая работа, поскольку вероятность разрушения ядер α -частицами ничтожно мала. Чтобы прийти к убедительным заключениям о характере превращений, Блэккетт сделал свыше 20 тысяч вильсоновских фотографий. Среди этих фотографий он обнаружил только восемь, которые отображают расщепление ядра азота. На них жирный след α -частицы прерывается «вилкой»: вместо следа α -частицы возникают два других следа. Один из них принадлежит атому кислорода, а другой - протону. Результат исследования таких картин привел к заключению, что Резерфорд в своих опытах наблюдал не разрушение ядра атома азота, а скорее превращение этого ядра в результате проникновения в него α -частицы. Исследования Блэккетта стали наглядным и окончательным доказательством существования *протона*. Свободный протон является стабильной частицей — согласно экспериментальным данным среднее время жизни протона превышает 10^{30} лет.

Вскоре после открытия атомного ядра Резерфордом французский физик Поль Ланжевен (1872-1946) отметил, что ядерная модель атома несколько не соответствует данным о радиоактивном распаде. Он обратил внимание, что радиоактивные вещества испускают также β -лучи, которые, по всей вероятности, исходят из глубин атома. Поэтому он предположил, что в атомном ядре должны находиться также электроны. Эта точка зрения была поддержана многими физиками. В частности, Мария Кюри-Склодовская считала, что в атоме существуют «*основные*», или «*ядерные*», электроны, а также «*периферические*» электроны. Испускание «*ядерных*» электронов приводит к разрушению самого атома, а «*периферические*» электроны могут быть оторваны от атома без изменения его химической природы. Необходимость включения в состав ядра помимо протонов еще и электронов обосновывалась следующим образом. Рассмотрим, например, атом гелия. Его атомный вес равен 4, поэтому его ядро должны бы состоять из 4 протонов. Но в периодической системе элементов гелий занимает второе место после водорода. Это значит, что заряд ядра гелия равен 2. Для компенсации положительного заряда четырех протонов и необходимы два электрона в составе ядра атома гелия. Аналогичные рассуждения приводили к необходимости существования электронов и в ядрах других атомов. Однако такая гипотеза противоречила ряду экспериментальных фактов, кроме того, нахождение электронов внутри ядра было несовместимо с соотношением неопределенностей. Тем не менее, представления такого рода держались в физике около 20 лет, пока не был открыт *нейтрон* - частица с массой протона, но не имеющая электрического заряда. Такую частицу открыл в 1932 г. Джеймс Чэдвик (1891-1974). В том же году независимо друг от друга Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904-1994) и Гейзенберг, рассматривая нейтрон как элементарную частицу, предложили протонно-нейтронную модель ядра. Эта модель сразу упростила понимание ядерных процессов и естественно объясняла существование изотопов элементов.

В свободном состоянии нейтрон распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино. Среднее время такого распада около 15 минут. В связи с этим естественно возникает вопрос: является ли тогда нейтрон «элементарной», а не «составной» частицей? Однако оказалось, что внутри ядра и протон тоже ведет себя как «составная» частица, распадаясь на нейтрон, позитрон и электронное нейтрино. Поэтому вопрос о том, какая из этих частиц «более элементарна», не имеет физического смысла.

Связь *нуклонов* (протонов и нейтронов), благодаря которой они образуют единую систему - ядро, осуществляется с помощью огромных короткодействующих *ядерных сил*. Эти силы в сотни раз сильнее сил электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами. Ядерные силы не зависят от знака заряда взаимодействующих частиц. Это - свойство *зарядовой симметрии ядерных сил*, которое является следствием *изотопической инвариантности*.

Последовательной законченной теории атомного ядра еще не существует, поскольку неизвестна аналитическая зависимость ядерных сил от определяющих их

параметров. Поэтому в ядерной физике используются различные *модели ядра*, которые описывают его свойства в определенном круге явлений.