**История физики: квантовая теория**

Горяев М.А.

К концу 19 века физика разделилась на две большие части: физику материи и физику излучения. Одна из важных термодинамических проблем состояла в описании взаимоотношений материи и энергии. В 1859 г. Кирхгоф показал, что, когда все тела внутри замкнутой системы достигают одинаковой температуры, устанавливается точное равновесие между поглощенной и отданной энергиями. Он ввел понятие абсолютно черного тела и сформулировал свой закон о том, что излучательная способность тела пропорциональна его поглощательной способности. Позднее венский профессор Иозеф Стефан (1835-1893) экспериментально открыл, а Больцман, исходя из термодинамики, подвел теоретическую основу под интегральный закон излучения черного тела о пропорциональности энергии излучения четвертой степени абсолютной температуры. В 1884 г. немецкий физик Вильгельм Вин (1864-1928), развивая идеи Больцмана, сформулировал свой закон смещения, что удельная интенсивность излучения пропорциональна пятой степени температуры и некоторой функции от произведения длины волны на температуру. Эту функцию пытались найти сам Вин, а также английские физики лорд Рэлей (Джон Уильям Стретт, 1942-1919) и Джеймс Хопвуд Джинс (1877-1946), но единого закона, описывающего и коротковолновую, и длинноволновую область излучения найти не удалось. Эту задачу объединения двух законов в 1900 г. решил Планк, предложив эмпирическую формулу для распределения излучения по длинам волн.

Планк Макс Карл Эрнст Людвиг (23.04.1858 - 04.10.1947) - немецкий физик, член Берлинской АН (1894, непременный секретарь в 1912-38), Лондонского королевского общества (1926), иностранный член АН СССР (1926). Его именем названо научное общество Германии, учреждена медаль М.Планка. Родился в Киле в семье профессора гражданского права. Окончил Мюнхенский университет (1878), где в 1879 получил степень доктора философии и работал в 1880-85. В 1885-88 - профессор Кильского университета, 1889-28 - профессор Берлинского университета и директор Института теоретической физики.

Работы относятся к термодинамике, теории теплового излучения, теории относительности, квантовой теории, истории и методологии физики, философии науки. В 1900 выдвинул гипотезу квантов, предположив, что атомные осцилляторы излучают энергию дискретно и последняя пропорциональна частоте колебаний, и вывел закон распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Ввел фундаментальную постоянную (постоянная Планка) с размерностью действия. Гипотеза квантов стала основой квантовой теории и положила начало развитию практически всех областей современной физики.

Планк одним из первых принял теорию относительности, вывел уравнения релятивистской динамики, получив выражения для энергии и импульса электрона. В 1907 провел обобщение термодинамики в рамках специальной теории относительности. Дал вывод законов химического равновесия в газах и разбавленных растворах (1887).

Планк ввел в рассмотрение новую величину - квант действия, означающую, что энергия колеблющимся осциллятором излучается только дискретно - квантами. По решению дополнительно возникающей проблемы распространения излучения Планк, не склонный к революционным шагам, занимает половинчатую позицию: испускание и поглощение излучения дискретно, а само излучение - непрерывно в соответствии с волновым характером распространения света и тепла. Только Эйнштейн в 1905 г. предложил порвать с классической оптикой и постулировать дискретность излучения в целом.

В течение долгого времени ведущие физики рассматривали гипотезу квантов лишь как форму объяснения, а не как физическую реальность. И только постепенно квантовая теория добивалась признания физической реальности квантов вследствие способности предсказывать новые явления и объяснять с их помощью другие закономерности. Планк получил Нобелевскую премию лишь в 1918 г., когда теория уже имела широкое признание. Кроме того, сама теория достаточно легко уживается с классической физикой в обычных границах в силу чрезвычайной малой величины постоянной Планка.

Подтверждения квантовой теории были разнообразны: квантовая теория позволяла рассчитать число Авагадро, которое хорошо совпадало со значениями, полученными другими методами, объяснить отклонения от закона Дюлонга и Пти об удельной теплоемкости при низких температурах. Основное же подтверждение и признание квантовая теория получила после введения в 1905 г. Эйнштейном квантов света и объяснения с их помощью фотоэлектрического эффекта, а также открытия в 1922 г. эффекта Комптона и в 1923 г. комбинационного рассеяния индийским физиком Чандрасекхара Раманом (1888-1970).

Комптон Артур Холли (10.09.1892–15.03.1962) – американский физик, член Национальной (1927) и многих академий наук, медали Румфорда (1927), Маттеучи (1933), Франклина (1940), Хьюза (1940) и др. Родился в Вустере в семье пресвитерианского священника, профессора философии. Окончил Вустерский колледж (1913) и Принстонский университет: магистр (1914) и доктор (1916). С 1916 проработал год преподавателем физики в Миннесотском университете, затем инженером-исследователем в "Вестингаус лэмп компани" (Питсбург). С 1919 провел год в Кавендишской лаборатории. В 1920-23 и 1953-61 – профессор университета Дж.Вашингтона (Сент-Луис) (1945-53 – ректор), в 1923-45 – Чикагского университета, в 1942-45 возглавлял Металлургическую лабораторию.

Работы в области атомной и ядерной физики, физики космических лучей. Открыл явление изменения длины волны рентгеновского излучения при рассеянии его электронами вещества (эффект Комптона) и независимо от П.Дебая построил его теорию (Нобелевская премия, 1927). Наблюдал явление полного внутреннего отражения рентгеновских лучей и разработал метод измерения их длины волны. В 1932 открыл (независимо от Я.Клея) широтный эффект космических лучей и наличие в них заряженных частиц, в 1921 пришел к идее спина.

Одновременно с получением подтверждения своей правомочности продолжалось и развитие самой квантовой теории. Предложенный Бором механизм испускания и поглощения излучения создал предпосылки для переосмысления взаимодействия материи и излучения.

Бор Нильс Хенрик Давид (07.10.1885–18.11.1962) – датский физик, член Датского королевского общества (1917, с 1939 – президент), более 20 академий наук, иностранный член АН СССР (1929), медали Планка, Копли и др., в его честь назван 105 химический элемент - нильсборий. Родился в Копенгагене в семье профессора физиологии. Окончил Копенгагенский университет (1907), там же получил степень магистра (1909) и доктора (1911). В 1911-12 работал в Кембридже у Дж.Дж.Томсона, в 1912-13 – в Манчестере у Э.Резерфорда. С 1916 – профессор Копенгагенского университета и с 1920 – директор созданного им Института теоретической физики (Институт Нильса Бора).

Важная заслуга Бора состояла в том, что он нашел принципиально новый подход для создания физической картины атомных процессов. Он ориентировал физиков на исследование противоречивых сторон физической реальности микромира, сформулировал идею о дискретности энергетических состояний атомов, в свете новых идей построил атомную модель, открыв условия устойчивости атомов, и объяснил большой круг явлений.

В 1913, исходя из идеи М.Планка о квантовании энергии с использованием модели атома Резерфорда, Бор создал теорию водородоподобного атома, основанную на двух постулатах, которые прямо противоречили классическим представлениям и законам. Он постулировал наличие в атоме стационарных разрешенных орбит, двигаясь по которым электрон не излучает энергию, но может перейти на другую разрешенную орбиту, испустив или поглотив при этом квант энергии, равный разности энергий атома в этих стационарных состояниях. Бор разработал некоторые правила квантования, нашел основные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов. В 1923 объяснил особенности периодической системы химических элементов, предложив свой вариант ее изображения, и пришел к представлению об оболочечной структуре атома, основанной на классификации электронных орбит по главному и азимутальному квантовым числам. За создание квантовой теории планетарного атома в 1922 награжден Нобелевской премией.

В 1918 Бор сформулировал важный для новой атомной теории принцип соответствия, показывающий, когда именно существенны квантовые ограничения, а когда можно пользоваться и классической физикой. В 1927 сформулировал важный для понимания квантовой механики принцип дополнительности.

Бор много сделал и для развития ядерной физики. В 1936 предложил теорию составного ядра, он является одним из создателей капельной модели ядра и теории деления атомного ядра, предсказал спонтанное деление ядра.

Бор создал большую интернациональную школу физиков: Ф.Блох, О.Бор, В.Вайскопф, О.Клейн, Х.Крамерс, Л.Д.Ландау, А.Пайс, Л.Розенфельд, Дж.Уилер и др.

В 1917 г. Эйнштейн внес крупный вклад в квантовую теорию, предложив статистические законы электронных переходов в атоме, в соответствии с которыми вероятность переходов пропорциональна интенсивности излучения и числу возбужденных атомов. Используя такие представления, ему удается получить формулу Планка, не прибегая к использованию аналогий с линейными осцилляторами. Одновременно обостряется проблема волна-частица, т.к. при элементарном акте излучения происходит испускание импульса в совершенно случайном направлении, что исключало описание излучения с использованием представлений сферических волн. Причем это уже было не расхождение между различными учеными 18 века, которые для объяснения одних и тех же явлений привлекали либо волновую, либо корпускулярную теорию. В 20 веке противоречие содержалось в самой физике: одни явления (дифракция) интерпретировались с волновых позиций, а другие (фотоэффект) - с корпускулярных.

Разрешение этого противоречия было предложено в 1923 г. де Бройлем, приписавшим волновые свойства частице - волны де Бройля.

Бройль Луи де (15.07.1892-19.03.1987) – французский физик, член Парижской АН (1933, 1942-75 – непременный секретарь), Лондонского королевского общества, иностранный член АН СССР (1927), медаль Пуанкаре (1929). Родился в Дьеппе в семье герцога. Окончил Парижский университет: бакалавр по истории (1910), ученая степень по физике (1913). Там же в 1928-62 был профессором.

Работы в области классической и квантовой механики, теории поля, квантовой электродинамики, истории и методологии физики. В 1923 распространил идею А.Эйнштейна о двойственной природе света на вещество, предположив наличие у материальных частиц волновых свойств, однозначно связанных с массой и энергией. Эту идею о всеобщности корпускулярно-волнового дуализма Э.Шредингер использовал при создании своей волновой механики. За открытие волновой природы электрона де Бройль в 1929 удостоен Нобелевской премии.

В 1925 г. Гейзенберг, следуя, как и Эйнштейн, принципу соответствия Бора, предложил матричный вариант квантовой механики, которая позволяла объяснить существование стационарных квантованных энергетических состояний и рассчитать энергетические уровни различных систем.

Гейзенберг Вернер Карл (05.12.1901–01.02.1976) – немецкий физик, почетный член многих академий наук и научных обществ, медали Маттеучи, Планка, Бора и др. Родился в Дуйсбурге в семье профессора древнегреческого языка. Окончил Мюнхенский университет (степень доктора, 1923), после чего был ассистентом М.Борна в Геттингенском университете. В 1924-27 работал у Н.Бора в Копенгагене, 1927-41 – профессор теоретической физики Лейпцигского университета, 1941-45 – директор Института физики кайзера Вильгельма и профессор Берлинского университета, 1946-58 – директор Физического института и профессор Геттингенского университета, с 1958 – директор Института физики и астрофизики и профессор Мюнхенского университета.

Работы в области квантовой механики, квантовой электродинамики, релятивистской квантовой теории поля, теории ядра, магнетизма, физики космических лучей, теории элементарных частиц, философии естествознания. В 1925 разработал матричную механику – первый вариант квантовой механики (Нобелевская премия, 1932). В 1926 объяснил отличия двух систем термов для пара- и ортогелия, в 1927 сформулировал принцип неопределенности, ограничивающий применение к микрообъектам классических представлений.

Совместно с П.Дираком в 1928 выдвинул идею обменного взаимодействия и независимо от Я.И.Френкеля разработал первую квантовомеханическую теорию ферромагнетизма, основанную на обменном взаимодействии электронов. В 1929 совместно с В.Паули предпринял попытку дать формулировку квантовой электродинамики, введя общую схему квантования полей. Развил (1934-36) теорию дырок Дирака, вслед за ним постулировал (1934) существование эффекта поляризации вакуума.

Вслед за Д.Д.Иваненко пришел к протонно-нейтронной модели ядра (1932), ввел понятие изотопического спина, показал, что ядерные силы насыщающие. Построил теорию ядерных сил, развив идею обменного взаимодействия Иваненко-Тамма. В 1943 в квантовой теории поля ввел матрицу рассеяния (S – матрицу) – важный инструмент для описания взаимодействия. В 1958 проквантовал нелинейное спинорное уравнение (уравнение Иваненко-Гейзенберга), занимался созданием единой теории поля.

Практически одновременно, развивая идеи волновой механики, в 1926 г. Шредингер предложил свое волновое уравнение и метод квантования, которые приводили к тем же результатам, что и квантовая механика Гейзенберга. Фактически это означало тождественность волновой и квантовой механики, хотя их математические методы существенно различаются.

Шредингер Эрвин (12.08.1887-04.01.1961) - австрийский физик, член ряда академий наук и научных учреждений, иностранный член АН СССР (1934), медали Маттеучи, Планка и др. Родился в Вене в семье предпринимателя. Окончил Венский университет, доктор философии (1910). Работал в Венском и Йенском университетах, 1920-21 - профессор Высшей технической школы в Штуттгарте и университета в Бреслау, 1921-27 – профессор Цюрихского, 1927-33 – Берлинского, 1933-36 – Оксфордского, 1936-38 – Грацкого университетов. 1941-55 – директор Института высших исследований в Дублине, с 1956 – профессор Венского университета.

Основные достижения в области квантовой теории и квантовой механики. Исходя из идей де Бройля о волнах материи и принципа Гамильтона, разработал теорию движения микрочастиц, в основу которой положил уравнение (уравнение Шредингера), играющее в атомных процессах такую же фундаментальную роль, как законы Ньютона в классической механике, и ввел для описания состояний микрообъекта волновую функцию. В 1926 доказал эквивалентность своей волновой механики и матричной механики Гейзенберга. В том же году построил квантовую теорию возмущений – приближенный метод в квантовой механике. За создание волновой механики удостоен Нобелевской премии (1933). Придерживаясь классических традиций полного детерминизма, Шредингер не принял квантовую механику как завершенную теорию.

Дальнейшие работы Шредингера относятся к теории мезонов, термодинамике, нелинейной электродинамике, общей теории относительности, разработке единой теории поля. Он имел разносторонние интересы: занимался лепкой, написал книгу по греческой философии, изучал проблемы генетики, опубликовал томик стихов и т.д.

В 1927 г. американский физик Клинтон Джозеф Дэвиссон (1881-1958) в лаборатории "Белл телефон" и английский физик Джордж Паджетт Томсон (1892-1975) в Абердинском университете (Шотландия) независимо открыли дифракцию электронов, экспериментально доказав наличие волновых свойств у частиц (Нобелевская премия по физике, 1937). А в 1929 г. немецкие физики Отто Штерн (1888-1969) и Иммануэль Эстерман (1900-1973) в опытах с атомарными пучками водорода также наблюдали дифракцию, показав, что любым корпускулярным пучкам присущи волновые свойства. Явление дифракции электронов нашло широкое применение в физических исследованиях поверхностных слоев и тонких пленок, а также в электронной микроскопии. Сейчас уже без волновой механики нельзя себе представить ни одной современной науки.

Шредингер, выводя свое уравнение, использовал подходы классической механики. В 1928 г. Дирак предложил свою теорию, которая включала представления о квантах, теории относительности и спине (такое понятие введено американскими физиками введено Джорджем Юджином Уленбеком (р.1900) и Самуэлем Абрахамом Гаудсмитом (1902-1979) в 1925 г.) и позволяла учитывать релятивистские эффекты.

Дирак Поль Адриен Морис (08.08.1902-20.10.1984) – английский физик, член Лондонского королевского общества (1930), почетный член ряда академий наук и научных обществ, иностранный член АН СССР (1931), Королевская медаль (1939), медаль Копли (1952), премия Оппенгеймера и др. Родился в Бристоле в семье учителя французского языка. Окончил Бристольский университет (1921), в 1926 защитил докторскую диссертацию в Кембридже. 1932-68 – профессор Кембриджского, с 1969 - Флоридского университета.

Работы в области квантовой механики, квантовой электродинамики, квантовой теории поля, теории элементарных частиц, теории гравитации. Разработал математический аппарат квантовой механики – теорию преобразований, предложил метод вторичного квантования. В 1927 применил принципы квантовой теории к электромагнитному полю и разработал первую модель квантованного поля. Предсказал тождественность вынужденного и первичного излучений, лежащую в основе квантовой электронике. В 1928 с В.Гейзенбергом открыл обменное взаимодействие.

Построил релятивистскую квантовую механику, предложив волновое уравнение, описывающее движение электронов и удовлетворяющее релятивистской инвариантности. Создал теорию дырок (1930), в 1931 предсказал существование античастиц, рождение и аннигиляцию электронно-позитронных пар, постулировал эффект поляризации вакуума (1933). За создание квантовой механики в 1933 был награжден Нобелевской премией.

Независимо от Э.Ферми в 1926 разработал статистику частиц с полуцелым спином. В 1932 совместно с В.А.Фоком и Б.Подольским предложил многовременной формализм - предшественник современной квантовой электродинамики. В 1936 построил общую теорию классических полей. Высказал (1937) гипотезу изменения гравитации со временем, работал над проблемой гамильтоновой формулировки теории гравитации для дальнейшего квантования гравитационного поля. В 1942 ввел понятие индефенитной метрики для устранения бесконечности собственной энергии электрона, в 1962 разработал теорию мюона, описываемого как колебательное состояние электрона.

Из теории Дирака следовало существование позитрона, который действительно был обнаружен в 1932-33 г.г. при ядерных распадах под действием космических лучей (открыты в 1911-13 г.г. австрийским физиком Виктором Францем Гессом (1883-1964)) американским физиком Карлом Дэвидом Андерсоном (р.1905) (Нобелевская премия по физике, 1936), а также английским физиком Патриком Мейнардом Стюардом Блэккетом (1897-1974) и итальянским физиком Джузеппе Оккиалини (р.1907).

Развивались и статистические методы описания поведения квантовых объектов. В 1924-25 г.г. индийский физик Шатвендранат Бозе (1894-1974) и Эйнштейн создали новую квантовую статистику для фотонного газа, получив распределение Планка, а в 1926 г. почти одновременно Ферми и Дирак вывели с учетом запрета Паули вывели свою статистику для электронов.

Ферми Энрико (29.09.1901-28.11.1954) - итальянский физик, член Национальной академии деи Линчеи (1935), многих академий наук и научных обществ, иностранный член АН СССР (1929). В США учреждена премия его имени, в его честь назван 100 химический элемент - фермий, его имя присвоено Чикагскому институту ядерных исследований. Родился в Риме в семье железнодорожного служащего. Окончил Пизанский университет (1922). В 1923-24 работал у М.Борна в Геттингенском и у П.Эренфеста в Лейденском университетах, с 1926 - профессор Римского университета. В 1938 эмигрировал в США: 1939-42 - профессор Колумбийского, 1942- 45 - Чикагского университетов (1944-45 - заведующий отделом Лос-Аламосской лаборатории), с 1946 - профессор Института ядерных исследований (Чикаго).

Работы в области атомной и ядерной физики, статистической механики, физики космических лучей, физики высоких энергий, астрофизики, технической физики. В 1926 разработал независимо от П.Дирака статистику частиц с полуцелым спином, в 1928 дал схему описания и расчета основного состояния многоэлектронных атомов (модель Томаса-Ферми). В 1929-30 разработал канонические правила квантования поля, в 1933-34 создал количественную теорию бета-распада, положив начало теории слабых взаимодействий. В 1934 открыл искусственную радиоактивность, обусловленную нейтронами, обнаружил и дал теорию явления замедления нейтронов (Нобелевская премия, 1938), высказал идею получения новых элементов при облучении урана нейтронами, в 1936 открыл селективное поглощение нейтронов. Все это положило начало нейтронной физике.

В 1939 независимо от Ф.Жолио-Кюри, Л.Сцилларда и других доказал, что при делении урана под действием медленных нейтронов излучаются 2-3 новых нейтрона и возможно осуществление цепной ядерной реакции. Построил первый ядерный реактор и 2 декабря 1942 впервые получил самоподдерживающуюся цепную реакцию.

В 1949 разработал теорию происхождения космических лучей, в 1950 - статистическую теорию множественного образования частиц (мезонов), в 1952 открыл адронный резонанс - изотопический квадруплет. Вместе с Ч.Янгом в 1949 предложил первую составную модель элементарных частиц (модель Ферми-Янга).

Паули Вольфганг (25.04.1900-14.12.1958) - австрийско-швейцарский физик, член Швейцарского физического и ряда других научных обществ, медали Франклина, Планка. Родился в Вене в семье профессора химии. Окончил Мюнхенский университет (степень доктора - 1921). В 1921-22 - ассистент М.Борна в Геттингенском университете, в 1922-23 - Н.Бора в Институте теоретической физики в Копенгагене, в 1923-28 - доцент Гамбургского университета, с 1928 - профессор Политехникума в Цюрихе (кроме 1935-36, 1940-45, 1949-50, 1954, когда работал в Принстонском институте перспективных исследований).

Работы во многих областях теоретической физики, в развитии которых он принимал непосредственное участие: квантовая механика, квантовая электродинамика, квантовая теория поля, теория относительности, теория твердого тела, ядерная физика, физика элементарных частиц. В 1924 выдвинул гипотезу ядерного спина для объяснения сверхтонкого расщепления спектральных линий, предложив существование спинового и магнитного моментов ядер. В 1924-25 сформулировал важнейший принцип о невозможности нахождения двух тождественных частиц с полуцелым спином в одном состоянии - запрет Паули (Нобелевская премия, 1945). Объяснил парамагнетизм электронного газа в металле (1927), структуру электронных оболочек атомов. В 1927 ввел в квантовую механику для описания спина электрона матрицы (спиновые матрицы Паули), создал теорию спина электрона. Совместно с В.Гейзенбергом в 1929 заложил основы систематической теории квантования поля. Объяснил (1928) сверхтонкую структуру атомных спектров.

Высказал в 1931 гипотезу о существовании нейтрино и описал в 1933 его основные свойства. Автор фундаментальных исследований по теории элементарных частиц и квантовых полей, мезонной теории ядерных сил. В 1940 доказал теорему о связи статистики и спина, в 1941 показал связь закона сохранения заряда с инвариантностью относительно калибровочных преобразований. В 1955 в окончательном виде сформулировал СРТ-теорему, отражающую симметрию элементарных частиц.

Таким образом, в результате развития квантовой теории появились две статистики: Бозе-Эйнштейна для бозонов (частиц с целым спином) и Ферми-Дирака для фермионов (с полуцелым спином).

Для разрешения дилеммы волна-частица в 1927 г. Гейзенбергом был сформулирован принцип неопределенности, в соответствии с которым нельзя одновременно точно определить координату и импульс (или энергию состояния и время пребывания в нем частицы). Здесь встает принципиальный вопрос о возмущении, которое вносит прибор и метод измерения в определение физической характеристики объекта. Это вызвало большие философские споры о реальности физического мира и физических представлений о реальном мире. Частично возникшие противоречия снимаются принципом дополнительности Бора, по которому любой частице присущи и волновые, и корпускулярные свойства, они друг друга взаимоисключают и взаимодополняют. Эти дискуссии о дуализме волна-частица, детерминизм-неопределенность продолжаются в современной физике.

В начале 50-х годов 20 века произошло крупное открытие в оптике: советские физики Николай Геннадиевич Басов (1922-2001) и Александр Михайлович Прохоров (1916-2002), а также американский физик Чарльз Хард Таунс (р.1915) обнаружили стимулированное излучение в молекулярных системах (Нобелевская премия по физике, 1964), предсказанное в 1917 г. Эйнштейном при описании взаимодействия электромагнитного излучения с молекулами. Это послужило основой создания оптических квантовых генераторов, а в начале 60-х годов были сконструированы первые лазеры, которые во многом определили развитие современной оптики. Лазеры широко применяются в спектроскопии, голографии, оптоэлектронике, информационных технологиях, медицине и других областях науки и техники.