

М.И. Баранов

## АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 34: ОТКРЫТИЕ И ИЗУЧЕНИЕ КВАНТОВО-ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ МИКРОМИРА МАТЕРИИ

*Наведено короткий аналітичний огляд основних наукових досягнень вчених в галузі відкриття і вивчення квантово-хвильової природи фізичних процесів і явищ, що протікають в мікросвіті матерії, що оточує нас. У число таких досягнень увійшли як квантові теорії теплового випромінювання абсолютно чорного тіла, атома, фотоелектричного ефекту і явища надтекучості рідкого гелію, що стали класичними, так і сучасні відкриття в галузі квантової електроніки та новітні квантовомеханічні результати для дрейфу вільних електронів і їх хвильових розподілів в провідниках електричних кіл із струмом.* Бібл. 27, рис. 15.

*Ключові слова:* квантова теорія теплового випромінювання, квантова теорія атома, електронні хвилі, квантова теорія фотоелектричного ефекту, квантова статистика мікрочасток, квантова теорія явища надтекучості гелію, квантова електроніка, квантово-хвильова природа дрейфу електронів в металі, огляд.

*Приведен краткий аналитический обзор основных научных достижений ученых в области открытия и изучения квантово-волновой природы физических процессов и явлений, протекающих в микромире окружающей нас материи. В число таких достижений вошли как ставшие классическими квантовые теории теплового излучения абсолютно черного тела, атома, фотоэлектрического эффекта и явления сверхтекучести жидкого гелия, так и современные открытия в области квантовой электроники и новейшие квантовомеханические результаты для дрейфа свободных электронов и их волновых распределений в проводниках электрических цепей с током.* Библи. 27, рис. 15.

*Ключевые слова:* квантовая теория теплового излучения, квантовая теория атома, электронные волны, квантовая теория фотоэффекта, квантовая статистика микрочастиц, квантовая теория явления сверхтекучести гелия, квантовая электроника, квантово-волновая природа дрейфа электронов в металле, обзор.

**Введение.** В процессе познания окружающей природы люди, накопив определенный «багаж» (запас) научно-технических знаний, поняли, что для человечества интересен и важен как для своего жизненного обитания в земных условиях, так и постоянного развития промышленного производства и различных прогрессивных технологий не только макромир, но и микромир, определяющий проявление в природе многообразных физико-химических и биологических процессов и макроскопических свойств вещества. Следует напомнить читателю то, что согласно современным представлениям о строении вещества под микромиром понимается совокупность размещенных в вакууме материальных объектов (тел) с линейными размерами 10 нм и менее [1]. Поэтому, практически начиная с конца 19-го столетия, ученые-физики и химики в меру своих теоретических возможностей и имеющегося в их распоряжении физико-химического инструментария стали активно заниматься исследованием микроскопических свойств вещества и открытием при этом новых физико-химических явлений. Первым в ряду подобных открытий стало обнаружение выдающимся немецким физиком-экспериментатором Вильгельмом Рентгеном (1845-1923 гг.) в 1895 г. так называемых X-лучей, получивших в недалеком будущем название «рентгеновского излучения» и отмеченных одной из первых Нобелевских премий по физике за 1901 г. [2, 3]. Затем в 1896 г. выдающимся французским ученым-физиком Анри Беккерелем (1852-1908 гг.) было открыто явление «радиоактивности», названное так в 1898 г. изучившими его выдающимися французскими физиками-химиками Марией Склодовской-Кюри (1867-1934 гг.) и Пьером Кюри (1859-1906 гг.) и за которое в 1903 г. А. Беккерель, а также М. Склодовская-Кюри и П. Кюри, открывшие к этому времени такие радиоактивные химические элементы

как полоний *Po* и радий *Ra*, были удостоены Нобелевской премии по физике [2, 3]. Укажем и то, что за выделение радиоактивного радия *Ra* в чистом металлическом виде и комплексное изучение его как химического элемента из периодической системы элементов Д.И. Менделеева [4] М. Склодовская-Кюри была удостоена во второй раз Нобелевской премии по химии за 1911 г. [2, 3]. Подобной чести на сегодня не удостоивалась больше ни одна женщина мира. В 1935 г. старшая дочь М. Склодовской-Кюри и П. Кюри Ирен Кюри (1897-1956 гг.) и ее муж Фредерик Жолио-Кюри (1900-1958 гг.), ставшие выдающимися французскими учеными-физиками, за открытие фундаментального явления «искусственной радиоактивности» получили Нобелевскую премию по химии [2, 3]. Возвращаясь снова к окончанию 19-го века, отметим, что в 1897 г. выдающимся английским физиком Джозефом Джоном Томсоном (1856-1940 гг.) были открыты носители элементарного электричества (своего рода «кванты электричества») – электроны [2, 3]. За это научное открытие Дж.Дж. Томсону была присуждена Нобелевская премия по физике за 1906 г. [3, 5]. Количественное значение отрицательного заряда электрона  $e_0=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, являющееся мировой постоянной, было определено опытным путем с удивительно высокой точностью (при погрешности измерений до 1 %) в 1917 г. выдающимся американским физиком-экспериментатором Робертом Милликенем (1868-1953 гг.) [2]. Результаты этих экспериментальных исследований Р. Милликена были высоко оценены международной научной общественностью и удостоены Нобелевской премии по физике за 1923 г. [3, 5].

К приведенному выше следует добавить то, что фактически еще в 1886 г. немецким физиком Эугеном Гольдштейном (1850-1930 гг.), впервые введшим

© М.И. Баранов

в электрофизику в 1876 г. термин «катодные лучи», в двухэлектродной электроразрядной трубке, заполненной наиболее распространенным в природе изотопом водорода протием  ${}^1_1\text{H}$ , были открыты «каналовые лучи» и присутствующие в них такие элементарные частицы как протоны, имеющие положительный электрический заряд [3, 6]. На то время величины ни их заряда, ни их массы известны еще не были. Это намного позже физиками-экспериментаторами достоверно было установлено, что модуль их заряда равен модулю заряда  $e_0$  электрона, а их масса  $m_p$  примерно в 1836 раз превышает массу  $m_e$  покоя электрона [1, 4]. В физике принято считать все же, что протон как элементарную частицу, «выбитую» альфа-частицей из атомного ядра, открыла в период 1914-1919 гг. группа талантливых английских физиков-атомщиков в составе Э. Резерфорда, Э. Марсдена и Дж. Нэттола [3, 4]. Здесь нельзя не указать и то, что такая крайне важная для понимания устройства микромира земной природы и нашей Вселенной в целом электронейтральная элементарная частица как нейтрон была открыта в ходе экспериментальных атомных исследований с помощью альфа-частиц в 1932 г. членом знаменитой физической школы Эрнеста Резерфорда, выдающимся английским физиком-экспериментатором Джеймсом Чэдвиком (1891-1974 гг.) [3, 5]. Масса  $m_n$  нейтрона с нулевым суммарным электрическим зарядом в соответствии с опытными данными современных ядерных измерений оказалась равной примерно  $1839 m_e$  [1, 4].

Во всемирной истории развития физики учение об атоме вещества и теории его строения занимают особое место. Причиной тому является фундаментальность данных вопросов, лежащих в основе строения материи. К 1913 г. благодаря результатам экспериментальных исследований с помощью «рентгеновского излучения» молодого талантливого английского физика Генри Мозли (1887-1915 гг.), трагически погибшего на поле сражений Первой мировой войны, была установлена одна из главных физических характеристик атома вещества – величина положительного заряда его ядра, расположенного в центре этого микрообразования [2, 5]. Эта величина, названная впоследствии «числом Менделеева», соответствовала порядковому номеру  $Z$  химического элемента в фундаментальной периодической системе элементов Д.И. Менделеева [4]. Используя опытные результаты своего ученика, выдающийся английский физик Эрнест Резерфорд (1871-1937 гг.) в 1913 г. после многолетних раздумий и поисков предложил научному миру известную *планетарно-ядерную модель атома* [3, 4]. Необходимо отметить, что предтечей такого знаменательного события в физико-химическом мире стали результаты исследований Э. Резерфорда и его другого молодого талантливого ученика, английского физика-химика Фредерика Содди (1877-1956 гг.), ставшего лауреатом Нобелевской премии по химии за 1921 г. [3], в области теории и практики радиоактивного распада химических элементов. За научные достижения в описании закономерностей радиоактивных превращений атомов как без внешнего вмешательства, так и бомбардируемых исходящими от радиоактивного источника, содержащего капсулу с радием  $Ra$ , альфа-

частицами – дважды ионизированными атомами гелия  ${}^4_2\text{He}$  и по существу их ядрами, Э. Резерфорд был удостоен Нобелевской премии по химии за 1908 г. [3].

**1. Макс Планк – основоположник квантовой теории теплового излучения.** На рубеже 19-го и 20-го веков в физической науке появились новые понятия и теории, существенно изменившие как научный «фасад», так и внутреннюю научную «начинку» казалось бы незыблемого «здания» классической физики. В 1897 г. талантливый немецкий физик Макс Планк (рис. 1) приступил к теоретическому исследованию динамики теплового излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Следует напомнить читателю то, что АЧТ считается такое физическое тело, которое поглощает все падающее на его поверхность тепловое (электромагнитное) излучение независимо от длины волны излучения и температуры тела [4]. Безусловно, что АЧТ является идеализированным физическим телом, отсутствующим в природе, но часто используемым нами в качестве расчетной теплофизической модели.



Рис. 1. Выдающийся немецкий физик-теоретик Макс Планк (1858-1947 гг.)

В 1900 г. М. Планк на основе принципиально нового и по сути революционного подхода показал, что излучение или поглощение физическим телом теплового излучения, имеющего, кстати, электромагнитную природу [4, 7], происходит не непрерывным, как предполагалось до этого в классической физике, а скачкообразным образом. И, причем, происходят эти процессы отдельными энергетическими порциями, названными им «квантами действия» [3, 4]. При этом величина кванта энергии  $E_n$  равна произведению некоторой фундаментальной постоянной  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, названной впоследствии в физике постоянной Планка [3], на квантованную частоту  $\nu_n$  ( $n=1,2,3,\dots$  – целочисленное значение квантового числа) волн излучения (поглощения) [4, 7]. За открытие дискретных квантов энергии (действия) М. Планку была присуждена Нобелевская премия по физике за 1918 г. [3, 6].

**2. Нильс Бор и создание квантово-ядерной модели атома.** При всей своей физической ценности и прогрессивности предложенная Э. Резерфордом

в рамках классической механики и электродинамики *планетарно-ядерная модель атома*, содержащая в центральной части положительно заряженное ядро и вокруг него на периферии отрицательно заряженную электронную сферообразную оболочку, имела один существенный и непреодолимый недостаток. Эта теоретическая модель электронейтрального атома с вращающимися вокруг неподвижного ядра связанными электронами была неустойчивой электродинамической системой. Согласно законам классической электродинамики движущиеся электроны в такой модели должны были непрерывно излучать электромагнитную энергию и со временем «падать» на ядро [4, 6]. В природе же таких внутриатомных процессов не наблюдается. Используя квантовую теорию выдающегося немецкого физика-теоретика М. Планка, выдающийся датский физик-теоретик Нильс Бор (1885-1962 гг.) в 1913 г. для преодоления указанного выше принципиального недостатка *планетарно-ядерной модели атома Резерфорда* предложил новую гипотезу (гр. слово «*hypothesis*» обозначает «*научное предположение*» [8]) о том, что атом вещества поглощает и испускает электромагнитную энергию отдельными дискретными порциями (квантами) [3]. Н. Бор (рис. 2) при этом сформулировал новые физические представления о том, что атом вещества может находиться в некотором дискретном ряде стационарных энергетических состояний, не сопровождающихся излучением (поглощением) им электромагнитной энергии [3, 4, 7].



Рис. 2. Выдающийся датский физик-теоретик Нильс Бор (1885-1962 гг.)

Кроме того, согласно выдвинутой Н. Бором гипотезы переход атома вещества из нормального (стационарного) в возбужденное энергетическое состояние может происходить только благодаря поглощению его связанными электронами, вращающимися в зоне атомной (электронной) оболочки по круговым орбитам вокруг ядра атома, кванта энергии (света) строго определенной величины [2, 4]. В случае поглощения связанным электроном такого кванта энергии он должен переходить на более удаленную от ядра атома круговую орбиту. Излучив на этой орбите

квантованным образом полученную ранее им электромагнитную энергию  $\Delta E_n$ , этот электрон вынужден был совершать скачкообразный переход с удаленной от ядра орбиты на свою изначальную и ближе расположенную к ядру орбиту радиусом  $r_n$ , где  $n=1,2,3,\dots$  – целое квантовое число, равное порядковому номеру электронной орбиты в атоме по мере удаления ее от его ядра [4, 7]. Нам не следует при этом путать это число  $n$  с главным квантовым числом, соответствующим числу электронных оболочек в атоме и номеру периода атома в периодической системе элементов Д.И. Менделеева. Причем, этот переход связанный электрон, излучивший квант энергии с частотой  $\nu_n = \Delta E_n/h$ , должен был совершать минув все промежуточные и дискретно заданные предложенной моделью атома круговые электронные орбиты. Именно в этом и заключалась основная идея разработанной Н. Бором *квантово-ядерной модели атома*. В 1922 г. Н. Бор за создание данной модели атома, имевшей фундаментальное значение для описания внутриатомных процессов, был удостоен Нобелевской премии по физике [3, 5]. Эта модель атома с успехом использовалась при описании внутриатомных процессов для простейшего атома вещества – изотопа водорода противя  ${}^1_1H$ , вокруг ядра которого, состоящего из одного протона  $p^+$ , по круговой орбите движется единственный электрон  $e^-$ . Квантовая теория атома Бора полностью удовлетворяла основному закону спектроскопии, полученному физиками экспериментальным путем и используемому постоянную Ридберга, численно равную  $R=3,289842 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  [4]. Она позволяла с высокой точностью вычислить указанную выше постоянную  $R=m_e e_0^4 (8\epsilon_0^2 h^2)^{-1}$ , исходя из четырех фундаментальных величин: модуля заряда электрона  $e_0=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, массы покоя электрона  $m_e=9,109 \cdot 10^{-31}$  кг, электрической постоянной  $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м и постоянной Планка  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Данная квантовая теория строения атома вещества обеспечила правильную физическую и количественную интерпретацию экспериментально обнаруженных ранее в лабораторных условиях физиками линейчатых спектров излучения для изотопа атома водорода  ${}^1_1H$  (противя), включая серии Лаймана, Бальмера, Пашена, Брекета и Пфунда [4, 7].

Следует отметить и то, что квантовая теория атома Бора получила в 1914 г. и свое прямое экспериментальное подтверждение в знаменитых опытах немецких физиков-экспериментаторов Джеймса Франка (1882-1964 гг.) и Густава Герца (1887-1975 гг.) по обнаружению дискретных возбужденных состояний ряда атомов (например, ртути  $Hg$ ) и определению энергии их ионизации [2, 4, 6]. Опытные результаты Дж. Франка и Г. Герца достоверно свидетельствовали о том, что энергия атомов изменяется дискретно квантованным образом со строго характерными для каждого вида атомов порциями энергии. Так, для атомов ртути  $Hg$  эта порция (квант) электромагнитной энергии, вызывающая их возбуждение с последующим испусканием ими наружу кванта энергии при переходе их в основное энергетическое состояние, составляла около 4,9 эВ, что соответствовало энергии кванта ультрафиолетового света с длиной волны в 253,6 нм [4, 6]. За выдающиеся результаты многолетних атом-

ных исследований Дж. Франк и Г. Герц были отмечены Нобелевской премией по физике за 1925 г. [3, 6].

**3. Альберт Эйнштейн и создание квантовой теории фотоэлектрического эффекта.** Как известно, явление *фотоэффекта* представляет собой изменение электрических свойств того или иного вещества под действием электромагнитного излучения (света, гамма-излучения, ультрафиолетовых, рентгеновских и др. лучей) [8]. В физике на сегодня известны [4, 7]: *внешний фотоэффект* (испускание веществом вольных электронов под действием света); *внутренний фотоэффект* (изменение электрического сопротивления вещества под действием квантов электромагнитного поля); *фотогальванический эффект* (возникновение электродвижущей силы в веществе под действием солнечного излучения); *ядерный фотоэффект* (возникновение ядерной реакции в веществе под действием гамма-квантов). Далее мы остановимся на *внешнем фотоэффекте* или *фотоэлектрическом эффекте*. Известно, что этот эффект наблюдал в 1887 г. один из основоположников классической электродинамики, выдающийся немецкий физик Генрих Герц (1857-1894 гг.), первым экспериментально доказавшим в 1888 г. существование электромагнитных волн [3, 6]. При этом Г. Герц установил, что электрический разряд в воздухе между двумя металлическими электродами происходит более интенсивно или при меньшем напряжении между электродами в случае подсветки разрядного промежутка световым потоком, содержащим ультрафиолетовые лучи. Физическое объяснение фотоэлектрическому эффекту с позиций зарождающейся квантовой механики было дано в 1906 г. выдающимся немецким физиком-теоретиком Альбертом Эйнштейном (1879-1955 гг.), изображенным на рис. 3.



Рис. 3. Выдающийся немецкий физик-теоретик Альберт Эйнштейн (1879-1955 гг.)

Развивая квантовую теорию М. Планка, А. Эйнштейн для светового излучения в 1905 г. ввел представление о свете как о потоке квантов электромагнитного поля или потоке фотонов и разработал фотонную теорию света [3, 4, 9]. В этой теории А. Эйнштейн, исходя из квантовой теории электромагнитно-

го излучения, показал, что не только излучение света, но его распространение и поглощение осуществляется дискретно (порционно) с помощью *«световых квантов»*. Именно такой новый квантовомеханический подход позволил ему сформулировать закон внешнего фотоэффекта (в физику он вошел как *«закон Эйнштейна для фотоэффекта»*) [3, 9]. За открытие на основе квантовой теории закона фотоэлектрического эффекта А. Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике за 1921 г. [3, 9]. Эксперименты американского физика Р. Милликена, выполненные с высокой точностью в 1916 г., соответствовали теории фотоэффекта А. Эйнштейна [9]. Убедительным доказательством дискретности электромагнитной энергии и существования фотона явились результаты экспериментальных исследований другого американского физика Артура Комптона (1892-1962 гг.) по изменению длины волны рентгеновского излучения из-за его рассеяния электронами твердого тела (*эффект Комптона*) [4]. В 1927 г. А. Комптон за открытие и построение теории *«квантового явления Комптона»* стал лауреатом Нобелевской премии по физике [3, 7].

**4. Луи де Бройль и открытие электронных волн.** В истории физики оказалось, что Луи де Бройль (рис. 4) первым внес в современную физику научную идею о волновых свойствах материальных микрочастиц [10]. Исходным пунктом в знаменитых работах выдающегося французского физика-теоретика Луи де Бройля (1892-1987 гг.), посвященных волновым свойствам материальных микрочастиц, стала гениальная физическая идея выдающегося немецкого физика-теоретика А. Эйнштейна, сформулированная им в 1905-1917 гг., о квантовой структуре света (о *«квантах света»*) [3, 11]. Он выдвинул и обосновал гипотезу об универсальности дуализма в микромире [10, 11].



Рис. 4. Выдающийся французский физик-теоретик Луи де Бройль (1892-1987 гг.)

В 1923 г. Луи де Бройль в своих трех научных статьях осуществил существенное развитие идеи А. Эйнштейна о двойственной природе света. Свой оригинальный подход он связал с переносом корпускулярно-волнового дуализма света (его одновременной

двойственности как частицы и как волны) на микро-частицы вещества с массой покоя. Исторически получилось так, что идея о волновой природе материи принадлежит именно этому талантливому ученому. А. Эйнштейн в свое время написал [10]: «...Де Бройль был первым, кто осознал тесную физическую и формальную взаимосвязь между квантовыми состояниями материи и явлениями резонанса еще в те времена, когда волновая природа материи не была открыта экспериментально». Каждой частице материи должна соответствовать волна материи. Эта смелая и революционная мысль Луи де Бройля позволила ему получить ставшее теперь классическим соотношение для длины  $\lambda_e$  волны нерелятивистского электрона в виде [4, 7]:  $\lambda_e = h/(m_e v_e)$ , где  $v_e$  – скорость электрона. Молодой Луи де Бройль считал, что [10]: «...Электрон не может более рассматриваться как простая крупинка электричества. С ним следует связать волну». Полученные физические результаты Луи де Бройль обобщил в 1924 г. в своей докторской диссертации на тему «Исследования по квантовой теории», которую он успешно защитил в Парижском университете (в знаменитой «Сорбонне») [3, 6]. За открытие волновой природы электрона Луи де Бройлю была присуждена Нобелевская премия по физике за 1929 г. [3]. На церемонии его представления и вручения ему этой премии говорилось [10]: «...Де Бройль открыл совершенно новый аспект природы материи, о котором ранее никто не подозревал. Блестящая догадка де Бройля разрешила давний спор, установив, что не существует двух миров, один – света и волн, другой – материи и корпускул. Есть только один общий мир». Какая мудрая и глубокая философско-физическая мысль!

Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля о волновых свойствах электронов было осуществлено выдающимся английским физиком-экспериментатором Джорджем Томсоном (1892-1975 гг.) – сыном ранее указанного мэтра мировой физики Джозефа Джона Томсона, который независимо от американских физиков-экспериментаторов Клинтона Дэвиссона (1881-1958 гг.) и Лестера Джермера (1896-1971 гг.) в 1927 г. открыл дифракцию электронов низких энергий («катодных лучей») на монокристалле никеля Ni [3, 4]. В ходе своих опытов Дж. Томсон показал, что полученные им дифракционные картины очень напоминали уже известную к тому времени дифракцию «рентгеновских лучей». За это выдающееся открытие Дж. Томсон и К. Дэвиссон были удостоены Нобелевской премии по физике за 1937 г. [3, 6].

**5. Эрвин Шрёдингер и создание волновой механики.** Опираясь на законы классической теоретической механики, австрийский физик-теоретик Эрвин Шрёдингер (рис. 5) в 1926 г. опубликовал свои знаменитые четыре статьи, в которых изложил принципиально новый подход к решению квантовых задач для объектов атомной физики [3, 6]. В них он задачи квантовой теории для микромира свел к задаче математической физики на собственные значения некоторой функции, названной им «волновой функцией» [6, 12].

Для математического нахождения данной волновой функции ( $\psi$ -функции) применительно к атому вещества он получил соответствующее дифференциаль-

ное уравнение в частных производных второго порядка (в историю физики оно вошло как «уравнение Шрёдингера» [3, 6]), описывающее поведение связанных электронов в известной ему планетарно-ядерной модели атома [4, 12, 13]. Это волновое уравнение Шрёдингера оказалось обобщением и применением указанных нами ранее «волновых идей» французского физика-теоретика Луи де Бройля к водородоподобному атому [4]. Решение данного уравнения сводилось к стоячим электронным волнам в указанном атоме [4, 6].



Рис. 5. Выдающийся австрийский физик-теоретик Эрвин Шрёдингер (1887–1961 гг.)

Создание волновой (квантовой) механики позволило Э Шрёдингеру по-новому взглянуть на атомную теорию и внутриатомные процессы. Применение волнового уравнения Шрёдингера к описанию квантово-механических процессов в водородоподобных атомах вещества показало, что распределение их связанных электронов в атомной сферической оболочке подчиняется соответствующей квантованной волновой  $\psi_n$ -функции, описывающей в трехмерном пространстве стоячую волну вещества (волну де Бройля). Причем, в указанном случае каждой квантованной волновой  $\psi_n$ -функции соответствовала строго определенная квантованная энергия связанного электрона, указывающая на его энергетический уровень. При таком квантовофизическом подходе для анализа внутриатомных процессов получалось, что связанный электрон рассматриваемого атома мог переходить из одного энергетического состояния, которому соответствовала одна квантованная волновая  $\psi_n$ -функция, в другое энергетическое состояние, описываемое другой квантованной волновой  $\psi_n$ -функцией [4, 6]. Мало того, полученные при этом на основе точного решения волнового уравнения Шрёдингера для изотопа атома водорода  $^1H$  (протия) собственные значения энергии его связанного  $s$ -электрона ( $E_s = -13,6$  эВ) и наиболее вероятного радиуса его орбиты ( $r_s = 0,529 \cdot 10^{-10}$  м) полностью совпадали с расчетными результатами, вытекающими из квантово-ядерной модели атома Бора [4, 7]. По существу Э. Шрёдингером на основе закономерностей волновой механики была разработана новая квантовомеханиче-

ская модель атома (в историю физики она вошла как *квантово-волновая модель атома Шрёдингера*) [3, 4, 13]. За разработку новых форм атомной теории (*волновой механики*) Э. Шрёдингер был удостоен Нобелевской премии по физике за 1933 г. [3]. Согласно этой модели атома распределение электронов в его атомной оболочке описывается квантованными волновыми  $\psi_n$ -функциями, являющимися пространственными стоячими волнами [4]. Из модели атома Шрёдингера вытекало, что связанный электрон, находящийся в атомной оболочке на стационарной орбите, не может излучать энергию по той причине, что его состояние определяется указанной стоячей электронной волной. В теории атома Бора такое положение лишь постулировалось без физического объяснения [4]. Новая атомная теория Шрёдингера объясняла явление смещения энергетических уровней атома под действием внешнего сильного электрического поля (эффект Штарка, открытый в 1913 г. [2, 4, 7]). Квантовая теория Шрёдингера правильно объясняла спектральные линии в водородоподобном атоме [4]. Данная квантовая теория явилась крупнейшим научным открытием первой половины 20-го столетия в области физики атомных процессов.

Американские физики Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер, изучая в конце 1927 г. рассеяние электронов на монокристалле никеля  $Ni$  и сравнивая полученные ими опытные данные с расчетными результатами по известной в материаловедении формуле Брэгга-Вульфа, экспериментально подтвердили существование в природе электронных волн материи. Кроме того, одними из первых экспериментальных подтверждений положений квантовой (волновой) механики явились также физические опыты немецкого ученого Отто Штерна, проведенные им в 1929 г. Данные эксперименты были связаны с изучением волновой природы нейтральных атомов и молекул, рассеиваемых на двухмерной дифракционной решетке кристалла  $LiF$  [4, 6]. О. Штерном при этом было показано, что для легких атомов изотопа водорода  $^1H$  (протия) и гелия  $^4He$  в указанных условиях наблюдается четкая дифракционная картина, а для тяжелых атомов вещества, имеющих малую «дебройлевскую» длину волны, дифракционная картина получается нечеткой (расплывчатой). Причем, в проведенных физических опытах максимумы интенсивности на вышеприведенных нами дифракционных картинах наблюдаются в местах, где волны материи («дебройлевские» волны) собираются (интерферируют) в одинаковой фазе [4].

**6. Вольфганг Паули и формулировка «принципа запрета».** Австрийский физик-теоретик Вольфганг Паули (рис. 6) внес существенный вклад в развитие квантовой механики как теории физических процессов и явлений в микромире природы. В период 1924-1925 гг. он сформулировал свой знаменитый «*принцип запрета*» (в историю физики это понятие вошло как «*принцип запрета Паули*» [3]). По словам самого В. Паули [14]: «...*В атоме не может быть двух электронов, у которых все четыре квантовых числа были бы одинаковы*». В этом и состоит суть этого принципа. Наверное, введение данного физического понятия явилось главным достижением В. Паули в квантовой теории внутриатомных процессов [3, 14].



Рис. 6. Выдающийся австрийский физик-теоретик Вольфганг Паули (1900-1958 гг.)

В соответствии с фундаментальным «*принципом запрета Паули*» в атоме вещества в его электронных оболочках может находиться только один так называемый связанный электрон, характеризующийся соответствующим только для него определенным количественным набором используемых в атомной физике четырех квантовых чисел [4, 7]: главного квантового числа  $n$ ; орбитального квантового числа  $l$ ; магнитного квантового числа  $m_l$ ; спинового квантового числа  $m_s$ . Как известно, в атоме материи квантовое число  $n$  определяет его кинетическую и потенциальную энергии, квантовое число  $l$  – форму электронной орбиты, квантовое число  $m_l$  – положение электронной орбиты в атомном пространстве и квантовое число  $m_s$  – направление его кругового вращения вокруг собственной оси [4, 7]. Этот физический принцип сыграл огромную роль в определении порядка застройки связанными электронами атомной оболочки. За научное открытие «*принципа запрета Паули*» выдающемуся физики-теоретику 20-го века В. Паули была присуждена Нобелевская премия по физике за 1945 г. [3, 5, 6].

**7. Вернер Гейзенберг и формулировка «соотношения неопределенности».** Выдающийся немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг (рис. 7) оказался автором ряда фундаментальных научных результатов в квантовой механике. В 1925 г. им была разработана «*матричная механика*», явившаяся одним из теоретических направлений квантовой физики (в дальнейшем эта механика была доведена до совершенства немецкими физиками-теоретиками Максом Борном и Паскуалем Йорданом) [3]. Отправной «точкой» при создании В. Гейзенбергом этой механики, эквивалентной *волновой механике* Э. Шрёдингера и удостоенной Нобелевской премии по физике за 1932 г. [3], явился его принципиальный отказ от классических и не наблюдаемых исследователем внутриатомных процессов понятий «*положения*» и «*импульса*» электрона в атоме материи и применение вместо них понятий «*частоты*» и «*амплитуды*» его колебаний, которые исследователь мог с высокой точностью определить из оптического эксперимента [15]. В кванто-

вой механике импульс микрочастицы  $p=mv$ , где  $m$  и  $v$  – соответственно масса покоя и скорость микрочастицы, с длиной ее волны  $\lambda$  связан соотношением де Бройля ( $p=h/\lambda$ ) [4]. Как известно, длина волны  $\lambda$  является функцией формы волны и никак не пространственной координаты (например,  $z$ ). Поэтому импульс микрочастицы  $p$  не будет являться функцией координаты  $z$ . В этой связи в квантовой механике невозможно одновременно определить координату  $z$  и импульс  $p$  микрочастицы. В 1927 г. В. Гейзенберг для разрешения этого физического парадокса сформулировал основополагающее положение квантовой механики – «соотношение неопределенности», названное в дальнейшем его именем и имеющее, например, для сопряженных переменных «координата–импульс» вид [4]:  $\Delta z \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$ , где  $\Delta z$ ,  $\Delta p$  – неопределенности в нахождении координаты и импульса микрочастицы.

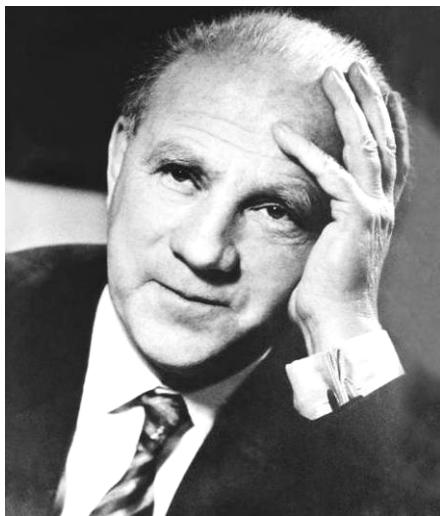


Рис. 7. Выдающийся немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг (1901-1976 гг.)

**8. «Боровская» формулировка «принципов соответствия и дополнительности».** После разработки своей знаменитой квантовой теории атома Н. Бор продолжал развивать эту теорию, пытаясь обобщить её на случай более сложных, чем атом водорода  ${}^1\text{H}$  (протий) многоэлектронных атомов. В 1918 г. в статье «О квантовой теории линейчатых спектров» Н. Бор сформулировал количественно так называемый «принцип соответствия», связывающий квантовую теорию с классической физикой [3, 16]. При этом он использовал свою же идею от 1913 г. о том, что в атомной оболочке переходы связанных электронов между стационарными орбитами с большими квантовыми числами должны давать излучение с частотой, совпадающей с частотой обращения электрона в атоме [16]. Формулируя этот принцип, Н. Бор отмечал [16]: «...*Всякий процесс перехода между двумя стационарными состояниями связан с соответствующей гармонической компонентой так, что вероятность наличия перехода зависит от амплитуды колебания. Поляризация же излучения обусловлена более детальными свойствами колебания также, как интенсивность и поляризация излучения в системе волн, испускаемых атомом по классической теории вследствие наличия указанных компонент колебания, определя-*

*ется амплитудой и другими свойствами последних».* Этот принцип позволил Н. Бору определить вероятности переходов электронов и соответственно интенсивности спектральных линий, а также получить правило отбора (в частности, для гармонического осциллятора) и дать интерпретацию числу и поляризации компонент «штарковского и зеемановского расщеплений» спектральных линий в сильных электрических и магнитных полях. «Принцип соответствия» сыграл огромную роль при построении последовательной квантовой механики [16]. Согласно этому принципу уравнения квантовой физики для больших квантовых чисел или при вовлечении в исследуемый процесс большого числа квантов должны совпадать с уравнениями классической физики для определяемых ими усредненных физических величин [4]. Другим важным для понимания физических основ и интерпретации результатов квантовой механики оказался «принцип дополнительности», предложенный Н. Бором в 1927 г. [3, 16]. Этот принцип отражает логическое соотношение между двумя способами описания или наборами представлений для одного и того же события в микромире. Ведь, с одной стороны, предсказания квантовой механики являются вероятностными. С другой стороны, для их интерпретации применяются представления и терминология из классической физики. В основу интерпретации квантовой теории Н. Бор положил корпускулярно-волновой дуализм для микрочастиц, на который первым обратил свое острое и пронизательное внимание Луи де Бройль. Сущность «принципа дополнительности» состоит в том, что для микрочастицы не может возникнуть такой физической ситуации, в которой оба дополнительные аспекты для нее (для одного явления в микромире) проявились бы одновременно и одинаково отчётливо [16]. Иными словами, в микромире нет физических состояний, в которых микрообъект имел бы одновременно точные динамические характеристики (например, координату, импульс, энергию и др. величины), принадлежащие двум определённым различным понятиям, взаимно исключающим друг друга. Именно это научное положение и нашло свое конкретное выражение в сформулированном В. Гейзенбергом в 1927 г. независимо от Н. Бора «соотношении неопределенности».

**9. Создание квантовой статистики микрочастиц.** Начнем здесь с того, что укажем, что в физике под квантовой статистикой понимается статистический метод исследования систем, состоящих из большого числа микрочастиц и подчиняющихся законам квантовой (волновой) механики [7]. Разработка в такой новой для первой половины 20-го века области физики как квантовая механика (физика) статистического подхода к описанию поведения систем с тождественными (одинаковыми) микрочастицами столкнулась с серьезными научными трудностями при попытке ученых-физиков нахождения числа энергетических состояний в произвольном газе (системе микрочастиц), содержащем подобные микрочастицы, которые могут характеризоваться своим «вырождением». К этому для лучшего понимания читателем данного сложного материала следует добавить то, что газ применительно к микрочастицам (например, «элек-

тронный газ» или так называемое «электронное облако» металлического проводника) считается «вырожденным» в случае, когда его свойства, описываемые квантовофизическими закономерностями, существенно отличаются от свойств обычного газа, подчиняющихся законам классической физики и соответственно законам базирующейся на ней статистической физики [7]. Важный шаг в преодолении возникших научных трудностей при создании квантовой статистики газа, состоящего из «вырожденных» микрочастиц, был сделан талантливыми физиками-теоретиками из Азии и Европы в первой четверти 20-го столетия [3].

**Квантовая статистика Бозе-Эйнштейна.** Известный индийский физик-теоретик Шатъендранат Бозе (1894-1974 гг.) в 1924 г. независимо от выдающегося немецкого физика-теоретика Альберта Эйнштейна (1879-1955 гг.) разработал квантовую статистику тождественных микрочастиц с целым и нулевым спином (понятие «*спин*» обозначает собственный механический момент количества движения вращающейся вокруг своей оси микрочастицы), получивших в физике элементарных частиц название «*бозонов*» (к ним относятся фотоны, фононы и некоторые ядра атомов) [3, 4, 7]. Данная статистика по имени ее создателей в квантовой физике получила название «*статистика Бозе-Эйнштейна*» [7, 16]. Укажем, что важной особенностью *бозонов*, названных в честь ученого-физика Ш. Бозе (рис. 8), является их неподчинение фундаментальному «*принципу запрета Паули*». Поэтому для *бозонов* не накладываются ограничения на число микрочастиц, которые могут находиться в определенном квантованном энергетическом состоянии. Применительно к данной квантовой статистике микрочастиц в аналитическом виде были получены функции распределения  $f_B$  *бозонов* (бозе-газов) по энергиям, которые в квантовой физике получили название функций распределения Бозе-Эйнштейна [4, 7, 17].



Рис. 8. Выдающийся индийский физик-теоретик Шатъендранат Бозе (1894-1974 гг.)

**Квантовая статистика Ферми-Дирака.** Молодой и в будущем выдающийся итальянский физик-теоретик Энрико Ферми (1901-1954 гг.), удостоенный в 1938 г. Нобелевской премии по физике за открытие

искусственной радиоактивности химических элементов, вызванной их бомбардировкой «*медленными*» нейтронами, в 1925 г. независимо от тогда также молодого и в будущем тоже выдающегося английского физика-теоретика Поля Дирака (1902-1984 гг.), ставшего в 1933 г. за открытие новых форм атомной теории (за создание *квантовой механики*) лауреатом Нобелевской премии по физике [3], разработал квантовую статистику для микрочастиц с полуцелым *спином* (например, для электронов, протонов, нейтронов и других представителей микромира материи) [7]. Важной особенностью таких микрочастиц (в физике элементарных частиц такие микрочастицы принято сейчас называть «*фермионами*» [4]) является то, что они подчиняются «*принципу запрета Паули*» и в определенном квантованном энергетическом состоянии из них может находиться либо только одна микрочастица, либо ни одной микрочастицы. Эта статистика по имени ее талантливых ученых-разработчиков Э. Ферми (рис. 9) и П. Дирака (рис. 10) в квантовой физике получила название «*статистика Ферми-Дирака*» [7].



Рис. 9. Выдающийся итальянский физик-теоретик, Энрико Ферми (1901-1954 гг.)

Соавторами этой квантовой статистики также в аналитическом виде были получены функции распределения  $f_F$  *фермионов* (ферми-газов) по энергиям, отвечающие среднему числу таких микрочастиц в одном энергетическом состоянии [4, 7]. Данные квантовомеханические функции  $f_F$  в квантовой физике получили название функций распределения Ферми-Дирака [7]. Из сравнения указанных аналитических функций распределения  $f_B$  и  $f_F$  с функцией распределения  $f_{MB}$  Максвелла-Больцмана [4], характерной для «старой» классической физики (соответственно и классической статистики) и отражающей среднее число «*невыврожденных*» микрочастиц в одном энергетическом состоянии, следует, что ни *бозоны*, ни *фермионы* не подчиняются классическому распределению микрочастиц по энергиям (скоростям) в обычных газах, описываемому полученной ранее еще в 19-ом столе-



тии классической функцией распределения  $f_{MB}$  Максвелла-Больцмана [7]. Учитывая, что фермионы входят в состав всех без исключения известных нам атомов и молекул вещества, созданная в первой четверти 20-го века «статистика Ферми-Дирака» приобретала исключительно важное научно-практическое значение для таких интенсивно развивающихся во всем мире областей знаний как ядерная физика, физика элементарных частиц, высоких энергий, плазмы и конденсированного состояния любой материи [3, 4, 7].



Рис. 10. Выдающийся английский физик-теоретик, Поль Дирак (1902-1984 гг.)

**10. Макс Борн и формулировка статистической интерпретации волновой функции микрочастицы.** В 1926 г. выдающийся немецкий физик-теоретик Макс Борн (1882-1970 гг.), применив физическую идею А. Эйнштейна о том, что квадрат амплитуды световых волн характеризует плотность вероятности  $\rho_F$  появления фотонов («квантов электромагнитного поля») [4], предложил научному миру статистическую интерпретацию волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера [3, 18]. При этом М. Борн (рис. 11) постулировал, что величина квадрата модуля квантованной волновой функции  $|\psi_n|^2$  должна представлять собой плотность вероятности  $\rho_n$  для пребывания микрочастицы (например, электрона, протона, нейтрона или др. частицы) в том или ином объеме вещества. Раскрыв физический смысл «шрёдингеровской» волновой  $\psi$ -функции, М. Борн перекинул тем самым своеобразный «мостик» между волновым и корпускулярным представлениями микрочастиц материи. Разработанный М. Борном физический подход был важным «шагом» на пути «примирения» старого классического представления «частиц вещества» с новым квантовомеханическим представлением «волн вещества» [3]. Статистическая интерпретация в 1926 г. М. Борном волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера оказалась первым «шагом» на пути изучения учеными вероятностной интерпретации квантовой механики (физики), определяющей поведение микрочастиц любого вещества.



Рис. 11. Выдающийся немецкий физик-теоретик Макс Борн (1882-1970 гг.)

Такая интерпретация волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера указывала на фундаментальную роль вероятности в законах микромира окружающей нас природы. Более быстрому признанию в мире подобной интерпретации волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера поспособствовало ранее описанное нами «соотношение неопределенности Гейзенберга», «примиряющее» корпускулярную и волновую картины распределения микрочастиц, объясняющее связь классической механики с квантовой механикой и ограничивающее применение к микроскопическим телам представлений классической физики. В 1954 г. М. Борн стал лауреатом Нобелевской премии по физике «за выдающиеся результаты в области квантовой механики» [3, 18].

**11. Лев Ландау и создание квантовой теории явления сверхтекучести жидкого гелия.** С приближением температуры физического тела к абсолютно нулю и резким уменьшением скоростей теплового движения атомов «дебройлевские» длины волн его атомов в соответствии с формулой де Бройля и квантовые неопределенности координат его атомов согласно «соотношению неопределенности Гейзенберга» становятся существенно больше его межатомных расстояний [6]. В этих условиях в конденсированном веществе существенную роль начинают играть квантовые эффекты и макроскопическим путем начинает проявляться квантово-волновая природа физических процессов, протекающих в конденсированном состоянии вещества («квантовой жидкости»). С подобным загадочным проявлением физических процессов столкнулись ученые-физики, получившие жидкий гелий-I с критической температурой 4,22 К и жидкий гелий-II (например, выдающийся нидерландский физик-экспериментатор Гейке Камерлинг-Оннес (1853-1926 гг.), ставший в 1911 г. лауреатом Нобелевской премии по физике за открытие явления сверхпроводимости металлов [3, 6]) и изучавшие их физические свойства (например, выдающийся советский физик-экспериментатор Петр Леонидович Капица (1894-1984 гг.), удостоенный в 1978 г. Нобелевской премии по физике за «фундаментальные изобретения и открытия в области низких температур» [3, 6]).

Эксперименты П.Л. Капицы в созданном им в 1935 г. Институте физических проблем (ИФП) АН СССР завершились открытием в 1937 г. явления сверхтекучести жидкого гелия-II с критической температурой 2,19 К [3, 4, 7]. Многие попытки отечественных и зарубежных физиков-теоретиков по объяснению парадоксального поведения жидкого гелия-II долгие годы оставались безуспешными. После перехода в 1937 г. из Украинского физико-технического института (г. Харьков) на работу в ИФП АН СССР (г. Москва) выдающийся советский физик-теоретик и будущий академик АН СССР (с 1946 г.) Лев Давидович Ландау (1908-1968 гг.) вплотную приступил к раскрытию феномена жидкого гелия-II. К 1941 г. Л.Д. Ландау (рис. 12) приходит к выводу о том, что в жидком гелии-II происходит фазовый переход II-рода, не сопровождающийся выделением (поглощением) тепла в отличие от фазового перехода I-рода и связанный с появлением у вещества качественно нового специфического свойства [4, 19].

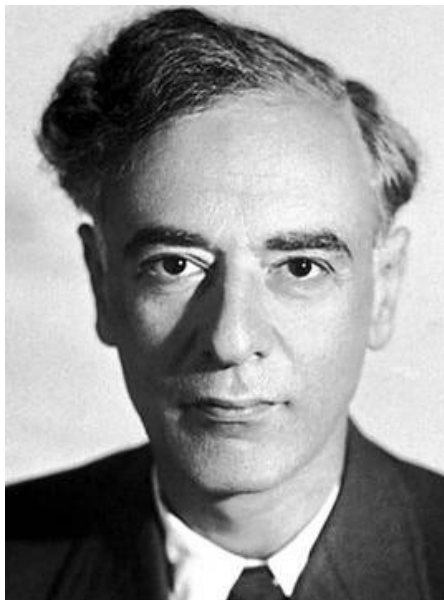


Рис. 12. Выдающийся советский физик-теоретик, академик АН СССР Лев Давидович Ландау (1908–1968 гг.)

Л.Д. Ландау при построении квантовой теории явления сверхтекучести жидкого гелия II-рода воспользовался понятием «квази-частиц» («как бы частиц»), в качестве которых выбрал *фононы* (звуковые кванты энергии, отвечающие за потенциальное движение материи) и *ротоны* (квантовые элементарные возбудители, отвечающие за вихревое движение материи) [3, 6]. Кроме того, Л.Д. Ландау при этом ввел понятия нормальной и сверхтекучей компонент жидкого гелия II-рода. Указанные квази-частицы описывали поведение нормальной компоненты в рассматриваемом гелиевом конденсате. Эта компонента двигалась в нем с трением и участвовала в переносе тепла. Сверхтекучая компонента двигалась в жидком гелии II-рода без трения и не участвовала в переносе в нем тепловой энергии. Таковы основные характеристики разработанной Л.Д. Ландау в 1945 г. двухжидкостной квантовой модели жидкого гелия II-рода. Выполненные в 1945 г. в ИФП АН СССР низкотемпературные

эксперименты с участием будущего доктора физико-математических наук Э. Андроникашвили подтвердили наличие в жидком гелии-II нормальной и сверхтекучей компонент, а также достоверность в целом созданной Л.Д. Ландау квантовой теории явления сверхтекучести жидкого гелия-II [3, 6]. Учитывая фундаментальность этого достижения, в 1962 г. Л.Д. Ландау была присуждена Нобелевская премия по физике «за пионерские исследования в теории конденсированного состояния, в особенности жидкого гелия» [3, 19].

## 12. Квантовая электроника и создание квантовых генераторов электромагнитного излучения.

Под «квантовой электроникой» понимается новая область физики, изучающая методы усиления и генерации электромагнитных колебаний, основанные на использовании эффекта вынужденного (индуцированного) излучения [4, 20]. Напомним, что в 1905 г. выдающийся немецкий физик-теоретик А. Эйнштейн, исходя из статистического анализа флуктуаций энергии равновесного излучения, выдвинул гипотезу о «световых квантах» [3]. В 1916 г. он пришел к пониманию природы равновесного излучения в квантовых системах, обладающих дискретными уровнями энергии излучения. Тогда же им для подобных систем было введено понятие «индуцированного испускания излучения», связанного с энергетическими квантовыми переходами частиц, входящих в единый физический ансамбль (атом, молекулу, твердое тело, газ и др.). В этой связи физическую основу квантовой электроники по [4, 20] составляют следующие три фундаментальных положения. *Первое* – энергия электромагнитного излучения состоит из дискретных порций энергии («световых квантов» или «фотонов»). *Второе* – излучение световых квантов при его высокой интенсивности определяется эффектом их индуцированного испускания. *Третье* – кванты вынужденного и вынуждающего электромагнитного излучения (фотоны) тождественны и подчиняются квантовой статистике Бозе-Эйнштейна. В результате квантовая природа электромагнитного излучения и квантование уровней энергии микрочастиц объективно приводят к существованию в микромире физических процессов, сопровождающихся генерированием тождественных друг другу световых квантов («бозонов»). Бозонность фотонов позволяет переходить в квантовой электронике от корпускулярного представления к волновому, для которого характерны принципы суперпозиции и усиления когерентных колебаний [4, 20]. В 1927 г. выдающимся английским физиком-теоретиком П. Дираком была разработана последовательная квантовая теория излучения (поглощения) света, важнейшим результатом которой явилось строгое обоснование «индуцированного излучения», постулированного А. Эйнштейном, и его когерентности [3, 21]. Несмотря на создание указанных выше физических предположений к возникновению в мире квантовой электроники, лишь к концу 1954 г. в области квантовой электроники был создан одновременно в СССР (в лаборатории колебаний Физического института АН СССР под научным руководством будущих академиков АН СССР Александра Михайловича Прохорова (рис. 13) и Николая Геннадиевича Басова (рис. 14), г. Москва) и

США (в лаборатории излучений Колумбийского университета под научным руководством профессора Чарльза Таунса (рис. 15), г. Нью-Йорк) первый «молекулярный квантовый генератор» микроволнового индуцированного излучения («аммиачный мазер»), имеющий узконаправленный пучок радиоизлучения с длиной волны 1,27 см [5, 21]. В этом физическом приборе благодаря примененной физиками энергетической сортировке и энергетическому возбуждению молекул аммиака в активной квантовой среде с инверсией населенностей, помещенной в объемный резонатор, осуществлялся квантовый переход между дискретными энергетическими уровнями в молекулах аммиака [4, 5]. Данный газовый мазер отличался высокой стабильностью вынужденного когерентного излучения.



Рис. 13. Выдающийся советский физик-экспериментатор, академик АН СССР Александр Михайлович Прохоров (1916–2002 гг.)



Рис. 14. Выдающийся советский физик-экспериментатор, академик АН СССР Николай Геннадиевич Басов (1922–2001 гг.)

Важный научный «шаг» отечественными учеными-физиками в области квантовой электроники был сделан в 1955 г., когда Н.Г. Басов и А.М. Прохоров предложили новый метод радиационного создания в

активной среде инверсии и неравновесных квантовых систем – «трехуровневый метод накачки», широко используемый в квантовых генераторах и понине [5].



Рис. 15. Выдающийся американский физик-экспериментатор Чарльз Таунс (1915–2015 гг.)

Квантовая электроника во второй половине 20-го столетия не ограничилась разработкой только усилителей микроволн посредством вынужденного электромагнитного излучения («мазеров»). В 1960 г. американским ученым-физиком Т. Мейманом на основе кристалла рубина был создан первый твердотельный «оптический квантовый генератор» («рубиновый лазер») [5]. Затем появились газовые, полупроводниковые, химические и иные «лазеры» [5, 21]. В 1964 г. Ч. Таунсу, А.М. Прохорову и Н.Г. Басову была присуждена Нобелевская премия по физике «за основополагающие работы по квантовой электронике, которые привели к созданию мазеров и лазеров» [3]. В настоящее время квантовые генераторы различной выходной мощности работают в непрерывном и импульсных режимах в достаточно широком частотном диапазоне волн индуцированного излучения. Сейчас в мире существует огромное разнообразие «мазеров» и «лазеров» с различными активными квантовыми средами и системами их возбуждения («накачки») [5, 20].

**13. Квантово-волновая природа дрейфа свободных электронов в металле.** Убедительным, наглядным и доступным для многих электрофизиков примером проявления квантово-волновых свойств у таких представителей микромира как электронов являются установленные на макроскопическом уровне недавно в Украине квантовофизические особенности протекания импульсного тока проводимости в металлах, обусловленного дрейфом их свободных электронов [22–27]. Данные особенности проявляются в том, что, например, в проводящей структуре тонкого оцинкованного стального проводника цилиндрической конфигурации с импульсным аксиальным током аperiодической временной формы 9/160 мс сравнительно большой плотности (до 0,37 кА/мм<sup>2</sup>) из-за формирования благодаря квантованным электронным полуволам де Бройля квантованных волновых электронных пакетов (ВЭП) макроскопических размеров в нем возникает продольная периодическая тепловая

макροструктура, состоящая из чередующихся между собой относительно «горячих» и «холодных» продольных участков с визуально фиксируемыми исследователем их длинами (ширинами)  $\Delta z_z$  и  $\Delta z_x$  соответственно. Причем, ширины  $\Delta z_z$  «горячих» продольных участков ВЭП проводника соответствуют указанному ранее «соотношению неопределенности Гейзенберга», определяющему неопределенность продольной координаты  $\Delta z$  дрейфующих электронов с максимальной энергией, приближающейся к энергии Ферми  $W_F$ , в наиболее вероятной зоне их нахождения, соответствующей квадрату модуля квантованной волновой функции  $|\psi_{en}|^2$  для этих электронов. В [22-27] было убедительно как теоретически, так и экспериментально показано, что дрейфующие в металлическом проводнике с электрическим постоянным, переменным или импульсным током свободные электроны («фермионы»), являющиеся квантовыми объектами и подчиняющиеся «принципу запрета Паули», а также удовлетворяющие «квантовой статистике Ферми-Дирака», из-за своей волновой природы по длине  $l_0$  и радиусу  $r_0$  указанного круглого цилиндрического проводника распределяются волновым образом так, что на его длине  $l_0$  и радиусе  $r_0$  всегда укладывается целое число квантованных электронных полувольт де Бройля соответственно длиной  $\lambda_{ln}/2=l_0/n$  и  $\lambda_{rn}/2=r_0/n$ , где  $n=1,2,3,\dots$  – целочисленное квантовое число. Квантованные величины  $\lambda_{ln}/2$  и  $\lambda_{rn}/2$  как раз и определяют шаг периодической структуры для указанных выше квантованных ВЭП в проводниках с электрическим током. Результаты исследований, представленные в [22-27], неопровержимо указывают на явное проявление в металлических проводниках с электрическим током большой плотности «квантового эффекта периодической макролокализации свободных электронов», определяющего возникновение в их проводящей структуре с ВЭП неоднородных периодических продольных и радиальных температурных полей.

**Вывод.** Природа существования и перехода материи на атомарном и субатомарном уровнях из ее одного физического состояния в другое, хаотичного (направленного) движения микрочастиц в физических полях и протекания обусловленных их пространственным перемещением тех или иных вероятностных микро- и макрособытий определяется стохастическими квантовыми физическими явлениями, протекающими в микромире любого вещества и описываемыми известными закономерностями квантовой, атомной и ядерной физики, а также закономерностями физики элементарных частиц, плазмы, высоких энергий и конденсированного состояния материи. В этой связи с учетом имеющихся на сегодня в научном мире теоретических и экспериментальных данных можно уверенно констатировать то одно принципиально важное научное положение, что известные (да, наверное, и еще неизвестные) физические процессы и явления в микромире материи носят квантово-волновой и вероятностный характер. Несмотря на это, квантово-волновые процессы, характеризующие объекты микромира, причинно связаны между собой и детерминированы. Они могут быть описаны соответствующими дифференциальными

уравнениями, однозначно определяющими искомые квантованные волновые  $\psi_n$ -функции и иные необходимые физические величины при изучении поведения и эволюции рассмотренных нами микроскопических представителей природы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества. – М.: Просвещение, 1977. – 160 с.
2. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
3. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Изд-во «Феникс», 2006. – 1176 с.
4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Х.: НТМТ, 2011. – 311 с.
6. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
9. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,\\_Альберт](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,_Альберт).
10. <http://100v.com.ua/en/node/2822>.
11. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Де\\_Бройль,\\_Луи](https://ru.wikipedia.org/wiki/Де_Бройль,_Луи).
12. Грашин А.Ф. Квантовая механика. – М.: Просвещение, 1974. – 207 с.
13. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,\\_Эрвин](https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,_Эрвин).
14. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,\\_Вольфганг](https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,_Вольфганг).
15. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,\\_Вернер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,_Вернер).
16. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,\\_Нильс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,_Нильс).
17. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,\\_Шатъендранат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,_Шатъендранат).
18. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,\\_Макс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,_Макс).
19. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,\\_Лев\\_Давидович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,_Лев_Давидович).
20. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/94619>.
21. [http://edu.sernam.ru/lect\\_qe.php?id=13](http://edu.sernam.ru/lect_qe.php?id=13).
22. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника. – 2005. – №7. – С. 25-33.
23. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // Технічна електродинаміка. – 2007. – №1. – С. 13-19.
24. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // Технічна електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 6-11.
25. Баранов М.И. Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током // Электротехника. – 2014. – №4. – С. 34-42.
26. Баранов М.И. Квантово-волновая природа электрического тока в металлическом проводнике и ее некоторые электрофизические макропроявления // Электротехніка і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
27. Баранов М.И. Основные характеристики волнового распределения свободных электронов в тонком металлическом проводнике с импульсным током большой плотности // Электротехника. – 2015. – №10. – С. 20-32.

#### REFERENCES

1. Astafurov V.I., Busev A.I. *Stroenie veshchestva* [Structure of matter]. Moscow, Education Publ., 1977, 160 p. (Rus).
2. Kudryavtsev P.S. *Kurs istorii fiziki* [The course of the history of physics]. Moscow, Education Publ., 1974, 312 p. (Rus).

3. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
5. Baranov M.I. *Antologiya vydayushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).
6. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiia v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushhiesja fiziki mira* [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2008. 252 p. (Rus).
7. Javorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 624 p. (Rus).
8. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
9. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,\\_Альберт](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,_Альберт) (accessed 10 April 2014). (Rus).
10. Available at: <http://100v.com.ua/en/node/2822> (accessed 12 May 2011). (Rus).
11. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Де\\_Бройль,\\_Луи](https://ru.wikipedia.org/wiki/Де_Бройль,_Луи) (accessed 18 September 2013). (Rus).
12. Grashin A.F. *Kvantovaja mehanika* [Quantum mechanics]. Moscow, Education Publ., 1974, 207 p. (Rus).
13. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,\\_Эрвин](https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,_Эрвин) (accessed 15 June 2012). (Rus).
14. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,\\_Вольфганг](https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,_Вольфганг) (accessed 10 April 2014). (Rus).
15. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,\\_Вернер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,_Вернер) (accessed 21 May 2012). (Rus).
16. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,\\_Нильс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,_Нильс) (accessed 10 May 2013). (Rus).
17. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,\\_Шатъендранат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,_Шатъендранат) (accessed 22 February 2010). (Rus).
18. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,\\_Макс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,_Макс) (accessed 21 April 2008). (Rus).
19. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,\\_Лев\\_Давидович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,_Лев_Давидович) (accessed 18 September 2013). (Rus).
20. Available at: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/94619> (accessed 11 May 2011). (Rus).
21. Available at: [http://edu.sernam.ru/lect\\_qe.php?id=13](http://edu.sernam.ru/lect_qe.php?id=13) (accessed 20 August 2012). (Rus).
22. Baranov M.I. Wave distribution of free electrons in conductor with electric current of the conductivities. *Electrical Engineering*, 2005, no.7, pp. 25-33. (Rus).
23. Baranov M.I. New physical mechanisms and approaches in the study of the formation and distribution of the electric conduction current in the conductor. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2007, no.1, pp. 13-19. (Rus).
24. Baranov M.I. Characteristic radial distribution of free electrons in a cylindrical conductor with varying electric current. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2009, no.1, pp. 6-11. (Rus).
25. Baranov M.I. Features heating thin bimetallic conductor large pulse current. *Elektrichestvo*, 2014, no.4, pp. 34-42. (Rus).

26. Baranov M.I. Quantum-wave nature of electric current in a metallic conductor and some of its electrophysical macrophenomena. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 25-33. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
27. Baranov M.I. Main characteristics of the wave distribution of free electrons in a thin metallic conductor with a pulse current of high density. *Elektrichestvo*, 2015, no.10, pp.20-32. (Rus).

Поступила (received) 21.12.2015

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,  
НИПКИ «Молния»  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov  
Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

**An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 34: Discovery and study of quantum-wave nature of microscopic world of matter.**

**Purpose.** Implementation of brief analytical review of the basic distinguished scientific achievements of the world scientists-physicists in area of discovery and study of quantum-wave nature of physical processes and phenomena flowing in the microscopic world of circumferential people matter. **Methodology.** Scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of scientific and technical information in area of theoretical and experimental physics, devoted the results of researches of quantum and physical processes flowing in nature on atomic and subatomic levels. **Results.** The brief scientific and technical review of the basic scientific discovery and achievements of scientists-physicists is resulted in area of structure of atom of matter, generation, radiation, distribution and absorption of physical bodies of short-wave hertzian waves, indicative on a dominating role in the microscopic financial world of positions and conformities to the law of wave (by quantum) mechanics, carrying especially probabilistic character a microstructure. **Originality.** Systematization is executed with exposition in the short concentrated form of the known materials on the quantum theory (electromagnetic) of caloradiance, quantum theory of atom, electronic waves, quantum theory of actinoelectricity, quantum statistics of microparticleless, quantum theory of the phenomenon superfluidity of liquid helium, quantum electronics and quantum-wave nature of drift of lone electrons in the metal of explorers with an electric current. **Practical value.** Popularization and deepening of fundamental physical and technical knowledges for students and engineer and technical specialists in area of classic and quantum physics, extending their scientific range of interests, and also support a further scientific study by them surrounding nature and to development of scientific and technical progress in society. References 27, figures 15.  
**Key words:** quantum theory of thermal radiation, quantum theory of atom, electron waves, quantum theory of photoelectric effect, quantum statistics of microparticles, quantum theory of the phenomena of superfluidity of helium, quantum electronics, quantum wave nature of the drift of electrons in metal, review.