

ИЗМЕНЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Н. Б. ДЕЛОНЕ

Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный Московской обл.

CHANGE OF THE FUNDAMENTAL LAWS OF THE NATURAL SCIENCES

N. B. DELONE

Discovery of the corpuscle-wave duality of the microparticles showed that the classical determinism is correct only in the macro-world, but the laws of micro-world have a stochastic nature. The way by which L. de Broglie has come to the formulation of his hypothesis and the experiments which have confirmed this hypothesis are discussed.

Открытие корпускулярно-волнового дуализма свойств микрочастиц показало, что классический детерминизм справедлив лишь в макромире, а законы микромира носят вероятностный характер. Обсуждаются тот путь, который привел Луи де Бройля к формулировке гипотезы о корпускулярно-волновом дуализме свойств микрочастиц, а также эксперименты, которые подтвердили эту гипотезу.

www.issep.rssi.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные закономерности, которым подчиняется окружающий нас мир, представляют первостепенный интерес для всего общества образованных людей (см., например [1]).

Сейчас трудно установить, когда человек начал анализировать окружающий мир. За много тысячелетий, прошедших с тех пор, у человечества сначала подсознательно, а потом и осознанно сложилась вполне определенная картина окружающего мира. Говоря современным языком, это трехмерный мир, в котором справедливы аристотелева, двузначная (либо да, либо нет) логика, принцип причинности, а все процессы протекают по законам классической физики. К концу XIX века никто не сомневался в справедливости этих фундаментальных закономерностей.

Однако в начале XX века были сделаны выдающиеся открытия, убедительно показавшие, что эти фундаментальные закономерности реализуются лишь в макромире, а в микромире закономерности иные. Разделение мира на макро- и микромир определяется той ролью, которую играет постоянная Планка. В микромире она играет определяющую роль, а в макромире ею можно пренебречь (см., например, [2]), за исключением некоторых экзотических эффектов [3].

Фундаментальным открытием в физике микромира явилась гипотеза французского физика Луи де Бройля (1899–1987) о корпускулярно-волновом дуализме природы микрочастиц. Из этой гипотезы и факта ее экспериментального подтверждения выросла новая волновая (квантовая) механика как метод описания микромира. Гипотеза де Бройля широко известна, она формулируется и обсуждается во всех монографиях и учебниках, посвященных физике микромира и квантовой механике, а также во многих научно-популярных книгах, в том числе написанных как самим де Бройлем [4], так и другим основателем квантовой механики, В. Гейзенбергом [5]. Данная статья посвящена гипотезе де Бройля и ее экспериментальному подтверждению,

при этом существенное внимание уделено тому состоянию физики, которое было в конце XIX века и явилось тем фундаментом, на котором выросла новая физика. Речь, конечно, пойдет не о всей физике в целом, а о тех ее главах, которые непосредственно связаны с обсуждаемым вопросом: о механике, физике микрочастиц и оптике.

2. СОСТОЯНИЕ МЕХАНИКИ, ФИЗИКИ МИКРОЧАСТИЦ И ОПТИКИ К НАЧАЛУ XX ВЕКА

а. Механика

Классическая механика, часто именуемая механикой Ньютона, представляет собой образец системы законов природы, в которых полностью доминирует детерминизм. Хорошо известно утверждение П. Лапласа: “Дайте мне данные всех частиц, и я вам предскажу будущее мира”. В основе классической механики лежит принцип причинности, обуславливающий упорядоченность событий в пространстве и во времени как вперед, так и назад. Следуя принципу причинности, состояние системы в предшествующий момент времени полностью определяет ее состояния в последующие моменты времени и наоборот. Математически строгое доказательство этого утверждения легче всего увидеть, если уравнения классической механики представить в виде гамильтоновых канонических уравнений для одной частицы во внешнем поле:

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p_k}, \quad \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q_k}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

В (1) $H = T + U$ – полная энергия частицы, являющаяся суммой кинетической энергии T и потенциальной энергии U во внешнем поле, q_k – координаты, p_k – импульсы частицы. Для частицы в трехмерном пространстве $k = x, y, z$. Таким образом, имеются шесть дифференциальных уравнений первого порядка относительно времени. Их решение позволяет выразить все q_k и p_k как функции времени и шести произвольных постоянных:

$$q_k = q_k(t; C_1, C_2, \dots, C_6), \quad p_k = p_k(t; C_1, C_2, \dots, C_6). \quad (2)$$

Если, например, для момента времени $t = 0$ известны все q_k^0 и p_k^0 , то, подставляя эти величины в (2), можно вычислить все шесть постоянных C_1, C_2, \dots, C_6 . Если эти постоянные известны, то (2) позволяет предсказать q_k и p_k для любого момента времени t , как $t > 0$, так и $t < 0$. Таким образом, из начального состояния можно предсказать состояние для любого последующего или предыдущего момента времени, что и есть определение принципа причинности.

Надо отметить, что сделанный выше вывод справедлив лишь при нескольких дополнительных предположениях [6], носящих, однако, частный характер.

Заканчивая этот раздел, еще раз подчеркнем, что в конце XIX века детерминизм классической механики представлялся совершенно незыблемым фундаментальным законом природы. Это положение оказывало влияние и на другие разделы естествознания. В рамках интересующих нас проблем можно указать на оптику и конкретно на корпускулярную модель света, согласно которой он распространяется прямолинейно в пространстве. Другой пример – это физика электрона и других микрочастиц, движение которых описывалось теми же законами классической механики, что и падение яблок с яблони или движение планет вокруг Солнца.

Создание специальной теории относительности в конце XIX и самом начале XX века (преобразования Х. Лоренца, “К электродинамике движущихся сред” А. Эйнштейна), то есть дополнение ньютоновской механики релятивистской механикой, никак не поколебало исходные позиции детерминизма в механике.

б. Физика микрочастиц

В отличие от классической механики исследования микрочастиц к началу XX века были в начальной стадии. Лишь в самом конце XIX века в результате серии экспериментов В. Крукса, Ж. Перрена, Дж.Дж. Томпсона и Ч. Вильсона был открыт электрон. Результаты этих экспериментов показали, что электрон представляет собой микрочастицу, отрицательно заряженную, имеющую массу порядка 10^{-27} г (что примерно в 2000 раз меньше массы атома водорода), распространяющаяся в вакууме при отсутствии внешних полей прямолинейно и отклоняющаяся под действием электрического или магнитного полей. Такие свойства электрона находились в полном соответствии как с классической механикой, так и с классической электродинамикой.

В 1913 году Э. Резерфорд предложил планетарную модель атома с электронами, вращающимися вокруг атомного ядра, а Н. Бор сформулировал свои знаменитые постулаты, определяющие строение атома. При этом не возникало никаких сомнений, что этот новый и еще детально не изученный субатомный мир микрочастиц описывается законами классической механики.

Единственный эксперимент тех лет вызывал недоумение – это эксперимент К. Дэвиссона 1921–1922 годов, в котором наблюдался процесс рассеяния электронов тонкими металлическими фольгами. Было обнаружено, что при падении пучка электронов на фольгу электроны рассеиваются в широкий диапазон углов, а распределение по углам носит характер сглаженных максимумов и минимумов. Между тем для

рассеяния достаточно узкого пучка достаточно монохроматических электронов классическая механика предсказывала, что электроны должны рассеиваться также в виде узкого пучка, направленного под определенным углом к падающему пучку. Предполагали, что наблюдаемый эффект является результатом наличия неоднородностей на поверхности фольги.

в. Оптика

В конце XIX века ситуация, сложившаяся в оптике, совершенно не предвещала тех драматических событий, которые разыгрались в начале XX века. Действительно, еще в начале XIX века работы О. Френеля завершили победное шествие волновой модели света. В середине XIX века работы М. Фарадея и Дж. Максвелла позволили создать детальное описание электромагнитного поля. В физику понятие поля ввел Фарадей, а уравнения Максвелла позволили в рамках единого подхода описать все известные оптические явления. В конце XIX века эксперименты Г. Герца продемонстрировали существование электромагнитных радиочастотных волн, основные свойства которых аналогичны свойствам световых волн. Триумф волновой модели света представлялся не подлежащим сомнению.

Важно также отметить, что теория электромагнитного поля Максвелла позволила получить строгое доказательство справедливости принципа причинности для такой новой формы существования материи, как электромагнитное поле. Для этого требуется лишь правильно выбрать набор параметров, характеризующих электромагнитное поле и заряды, — напряженности электрической \vec{E} и магнитной \vec{H} составляющих и плотности зарядов ρ и токов \vec{j} . Напомним, что в рамках механики Ньютона такое доказательство получено лишь для материи в виде частиц, имеющих массу покоя (см. выше, раздел 2а). Отметим, что как уравнение Ньютона, так и уравнения Максвелла обратимы во времени.

Монопольное положение волновой модели света было для всех неожиданно поколеблено двумя работами Эйнштейна, в 1905 и 1909 годах. Одна из этих работ — это всем известная знаменитая работа 1905 года, в которой Эйнштейн ввел понятие кванта света. Эйнштейн обратил внимание на результаты опытов Г. Герца, А.Г. Столетова, Ф.Э.А. Ленарда и Дж.Дж. Томпсона по наблюдению и исследованию процесса вырывания электронов из металлической поверхности электрода разрядного промежутка. Тот факт, что энергия вырываемых электронов не зависела от интенсивности, а зависела лишь от частоты излучения, было невозможно объяснить в рамках волновой модели света. Гениальность Эйнштейна хорошо проявилась в его подходе к

решению этого парадокса. Он не стал искать ответа на этот вопрос в рамках волновой теории, а постулировал, следуя Планку, квантовую природу света. Это предположение дало объяснение всем экспериментальным данным. Уравнение Эйнштейна

$$h\nu = T + A, \quad (3)$$

в котором T — кинетическая энергия электрона, а A — работа выхода электрона из металла, представляет собой закон сохранения энергии. При этом предполагается, что энергия поглощенного при фотоэффекте кванта света равна $h\nu$, где h — постоянная Планка, а ν — частота света.

Проверке справедливости гипотезы Эйнштейна и конкретно уравнения (3) были посвящены многочисленные эксперименты (Ф.Э.А. Ленарда, П.И. Лукирского, А.Ф. Иоффе, Р.Э. Милликена). Они качественно и количественно подтвердили справедливость и самой гипотезы световых квантов и уравнения (3).

Таким образом, эта работа Эйнштейна представляла собой новый и принципиальный шаг в возрождении корпускулярной модели света. Открытие в 20-х годах XX века эффекта Комптона (рассеяния рентгеновских лучей) и эффекта Рамана (комбинационного рассеяния света) явилось независимым дополнительным подтверждением корпускулярной модели света.

К 20-м годам XX века вся совокупность экспериментальных данных, относящихся к природе света, указывала на корпускулярно-волновой дуализм света. Так, если экспериментальные данные, относящиеся к фотоэффекту, эффектам Комптона и Рамана, были убедительным доказательством корпускулярной природы света, то результаты многочисленных экспериментов, в которых наблюдались дифракция и интерференция света, были не менее убедительным доказательством волновой природы света.

Однако теоретически корпускулярно-волновой дуализм природы света следовал уже из результатов работы того же Эйнштейна 1909 года, посвященной теории процесса флуктуаций излучения. Эта работа не так широко известна, как работа, объясняющая природу фотоэффекта, несмотря на следующий из нее важнейший вывод о природе света. Для нас интересно, что именно эта работа совместно с работой о фотоэффекте инициировала де Бройля, также занимавшегося в 1922–1923 годах флуктуацией излучения, на формулировку своей гипотезы о корпускулярно-волновой природе микрочастиц. Эйнштейн в своей работе исходил из канонического распределения Гиббса для физической статистики. С использованием распределения Гиббса для квадратичной флуктуации энергии излучения получается соотношение

$$\langle (\Delta E)^2 \rangle = \langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 = kT^2 \left(\frac{d\langle E \rangle}{dT} \right)_V. \quad (4)$$

В (4) k – постоянная Больцмана, $\langle \dots \rangle$ – усреднение по ансамблю фотонов, T – температура излучения, а $\langle E \rangle$ – спектральная плотность излучения в замкнутом объеме V (то есть энергия в единице объема и единичном интервале частот).

Для $\langle E \rangle$ известны три формулы: формула Вина для света высоких частот ν , формула Рэля–Джинса для низких частот ν и универсальная формула Планка для произвольных частот ν . Подставляя в формулу (4) соответствующие выражения можно получить для квадратичной флуктуации формулы (5) для высоких частот, (6) для низких частот и (7) для произвольных частот следующие соотношения, в которых c – скорость света:

$$\langle (\Delta E)^2 \rangle = \begin{cases} h\nu \langle E \rangle, & \text{если } h\nu \gg \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \langle E \rangle, & (5) \\ \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \langle E \rangle^2, & \text{если } h\nu \ll \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \langle E \rangle^2, & (6) \\ h\nu \langle E \rangle + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \langle E \rangle^2, & \text{если } h\nu \text{ произвольно.} & (7) \end{cases}$$

Видно, что формула для высоких частот (5) имеет типично квантовый характер (множитель $h\nu!$), формула (6) для низких частот – волновой характер, а универсальная формула (7) является суммой формул (5) и (6), так что она отражает и квантовые и волновые свойства излучения. Из совокупности этих формул видно, что излучение обладает одновременно и квантовыми и волновыми свойствами и лишь в предельных случаях низких или высоких частот можно пренебречь соответственно квантовыми или волновыми свойствами. Сам Эйнштейн о первом члене уравнения (7) сказал: “...если бы он был единственным, то давал бы такие флуктуации энергии излучения, как будто оно состоит из независимых квантов с энергией $h\nu$ ”.

Это поразительное теоретическое предсказание корпускулярно-волнового дуализма света разрешило споры о природе света, длившиеся в течение многих веков.

Заканчивая рассмотрение состояния исследований природы света, еще раз подчеркнем, что к моменту начала исследований де Бройля был окончательно установлен корпускулярно-волновой дуализм свойств света.

3. ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ

В 1923 году де Бройль публикует в трудах Французской академии три короткие заметки, в которых излагает и обсуждает свою знаменитую гипотезу корпускулярно-

волнового дуализма природы микрочастиц. Прежде чем обратиться к изложению и обсуждению гипотезы де Бройля, интересно и поучительно рассмотреть те предпосылки, которые привели автора к этому выдающемуся открытию.

При создании новой физической теории существенную роль играют фундаментальные идеи, так как началом являются всегда мысли, а не формулы. Идеи лишь в дальнейшем должны быть облечены в математические формулы для того, чтобы иметь возможность их сопоставлять с другими теориями и экспериментальными данными. Сам де Бройль в диссертации, написанной в 1924 году, говорит о своем открытии так: “После долгих размышлений и раздумий я внезапно понял в 1923 году, что открытие, сделанное Эйнштейном в 1905 году, следует обобщить и распространить на все материальные частицы, в частности на электроны”.

Таким образом, революционная идея Эйнштейна о корпускулярно-волновой природе света была тем стимулирующим импульсом, который привел де Бройля к распространению этой идеи на частицы.

Из книги де Бройля [4], а также из его оригинальных работ 20-х годов можно увидеть еще несколько вопросов, занимавших его в период созревания гипотезы о корпускулярно-волновом дуализме микрочастиц.

Де Бройль обратил внимание на тот факт, что электрон, находящийся в атоме в стационарном состоянии, описывается в теории Бора с помощью постоянной Планка h . Действительно, второй постулат Бора формулируется как $h\nu = E_m - E_n$, где E_m и E_n – значения энергии стационарных состояний, а $h\nu$ – энергия поглощаемого или излучаемого фотона при переходе между ними. Из сопоставления этого выражения с выражением (3) для закона Эйнштейна для фотоэффекта возникло предположение, что если появляется постоянная Планка, то это является признаком наличия корпускулярно-волнового дуализма.

Другим фактом, привлечшим внимание де Бройля, было формальное сходство между классической механикой и геометрической оптикой, которое отметил еще У.Р. Гамильтон в начале XIX века. Однако оставалось неясным, как сопоставить движение частицы и волны. Так, в случае частицы речь идет о скорости перемещения материального тела, а в случае волны – о фазовой скорости. Напрашивалась необходимость как-то связать величины, описывающие волну, с величинами, характеризующими частицу. При этом представлялось заманчивым выполнить это, используя постоянную Планка h .

Наконец, удивительным было появление в теории атома Бора целых чисел. (Вспомним формулу Бальмера

для частот фотонов при переходе электрона между стационарными состояниями в атоме водорода с главными квантовыми числами $n = 2, 3, 4, 5, \dots$, $v = \text{const} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$.

В классической физике целые числа встречаются лишь в теории волн, например при возникновении интерференции. Эти целые числа в теории Бора очень занимали мысли де Бройля.

Судя по публикациям статей де Бройля, он примерно в течение года непрерывно обдумывал эти и другие смежные вопросы, пока наконец в конце лета 1923 года произошла, как он сам вспоминал через двадцать лет, “своего рода кристаллизация: разум в один момент схватывает с большой ясностью основные очертания новых понятий, которые ранее незаметно формулировались в нем, и он получает вдруг абсолютную уверенность в том, что применение этих новых понятий позволит разрешить большинство поставленных проблем и прояснить весь вопрос, апеллируя к до сих пор не учитывавшимся аналогиям и соответствиям”. Так появилась гипотеза де Бройля о корпускулярно-волновой природе микрочастиц.

Гипотеза де Бройля состояла в том, что с любым движущимся телом, имеющим или не имеющим массу покоя, связана волна частоты ν . При этом энергия E и импульс p этого тела связаны с длиной волны λ и частотой ν волн соотношениями, содержащими постоянную Планка h :

$$E = h\nu, \quad (8)$$

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (9)$$

Для нерелятивистского движения тела импульс связан с его массой m соотношением $\vec{p} = m\vec{v}$, где \vec{v} – скорость тела. Используя эту связь можно получить для длины волны де Бройля соотношение

$$\lambda = \frac{h}{m\nu}. \quad (10)$$

Волна при этом может быть описана квантово-механической волновой функцией

$$\Psi(\vec{r}, t) = Ae^{i(kr - \omega t)} = Ae^{\frac{i}{\hbar}(\vec{p}\vec{r} - Et)}, \quad (11)$$

в которой $\vec{k} = \vec{p}/\hbar$ – волновой вектор, $\hbar = h/2\pi$, $\omega = 2\pi\nu$.

Так как частица, например электрон, представляет собой объект, который хорошо локализован в пространстве, то с ним не может быть связана бесконечная плоская волна, волна должна быть также хорошо локализована в пространстве. Де Бройль предположил, что это группа волн, имеющих весьма близкие частоты, то,

что сейчас называется волновым пакетом. Центр волнового пакета перемещается с групповой скоростью, совпадающей со скоростью частицы (что видно из формулы Рэлея для групповой скорости волны в среде с дисперсией).

Из выражений (9) и (10) видно, что де Бройль перенес на частицы с массой покоя уже известную к тому времени модель корпускулярно-волновой природы фотона, частицы, не имеющей массы покоя, что дало исходное соотношение для длины волны де Бройля (10). Однако ход его мысли при этом был противоположен ходу мысли Эйнштейна. Если Эйнштейн стартовал с волновых свойств света и предположил наличие его корпускулярных свойств (квантов света), то де Бройль стартовал с корпускулярных свойств частицы и предположил наличие у нее также и волновых свойств.

Сформулировав свою гипотезу, де Бройль дал ответ на волновавшие его вопросы, перечисленные в начале этого раздела.

Во-первых, корпускулярно-волновой дуализм был перенесен и на частицы с массой покоя. Во-вторых, использование групповой скорости волны в рамках принципа Ферма привело его в соответствие с принципом Мопертюи для частицы с массой покоя, движущейся со скоростью v . Наконец, в-третьих, появилось и объяснение целым числам в теории атома Бора: стационарные орбиты (состояния электрона в атоме) – это те, на длине которых точно укладывается целое число n длин волн де Бройля (10) для электрона, движущегося по данной орбите.

Однако де Бройль понимал наиболее важное следствие из своей гипотезы. Он уже в 1923 году писал: “...любое движущееся тело в определенных случаях может дифрагировать. Поток электронов, проходящий через достаточно малое отверстие, должен обнаруживать явление дифракции”. В диссертации, написанной в 1924 году, он уже использовал свою гипотезу для качественного и количественного описания различных оптических явлений.

Первая реакция на идеи де Бройля была скорее негативной, чересчур революционный характер этой гипотезы нарушал устоявшийся и привычный взгляд на частицы как на типичный объект классической механики. Однако многое представлялось убедительным. Характерна реакция Эйнштейна, который в 1925 году, советуя Борну прочесть диссертацию де Бройля, писал: “Прочтите ее! Хотя и кажется, что ее писал сумасшедший, написана она солидно”. Однако прошло всего несколько лет, и гипотеза де Бройля была подтверждена многочисленными экспериментами и легла в основу волновой (квантовой) механики, развитой среди выдающихся теоретиков также и де Бройлем.

Сейчас, на рубеже второго и третьего тысячелетий, не вызывает сомнений, что гипотеза де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме природы микрочастиц является выдающимся вкладом в познание человеком окружающего мира.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ ДЕ БРОЙЛЯ

По формуле (10) для длины волны де Бройля легко оценить, что для медленных электронов, имеющих энергию ~ 10 эВ, величина λ порядка длины волны рентгеновского излучения. Рентгеновский диапазон частот был к тому времени уже хорошо освоен экспериментаторами, в частности при наблюдении эффекта Комптона. Поэтому проведение экспериментов по наблюдению волновых свойств электрона представлялось вполне реальным. В 1926 году М. Борн, обсуждая с К. Дэвиссоном результаты его старых опытов по рассеянию электронов металлическими фольгами (упомянутыми выше, в конце раздела 2б), обратил его внимание на гипотезу де Бройля как возможную причину объяснения максимумов и минимумов в угловом рассеянии электронов. Если гипотеза де Бройля верна, то результат рассеяния электронов на отдельном крупном кристалле в металлической фольге должен быть эквивалентен результату интерференции рентгеновских лучей при их отражении от кристалла, наблюдавшемся отцом и сыном Брэггами в начале XX века. В 1927 году К. Дэвиссон и Л. Джермер возобновили опыты 1922–1923 годов, улучшив постановку эксперимента, и получили для рассеяния электронов от монокристалла никеля результаты, хорошо согласующиеся с формулой Брэгга–Вульфа:

$$\lambda_n = \frac{1}{n} \cdot 2d \sin \varphi,$$

φ – угол падения волны на поверхность кристалла, $n = 1, 2, 3, \dots$, а d – постоянная кристаллической решетки, константа, определяемая типом кристалла и его ориентацией. Это было первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля.

В дальнейшем для наблюдения волновых свойств электронов использовали детально разработанные в оптике классические методы Лауэ и Дебая–Шерера, позволившие получить прекрасные фотографии интерференционных колец.

Несмотря на такое обилие экспериментальных данных, подтверждающих гипотезу де Бройля (рис. 1), причем при различной постановке эксперимента, оставался один важный вопрос, на который отсутствовал ответ: не являются ли экспериментальные данные результатом коллективного взаимодействия многих электронов с мишенью? Действительно, все опыты проводили при большой интенсивности электронного пучка,

такой, что одновременно с мишенью взаимодействовало много электронов. Ответ на этот вопрос был получен значительно позже, лишь в 1949 году, в результате исследования, проведенного в Москве Л.М. Биберманом, П.П. Сушкиным и В.А. Фабрикантом. Они наблюдали

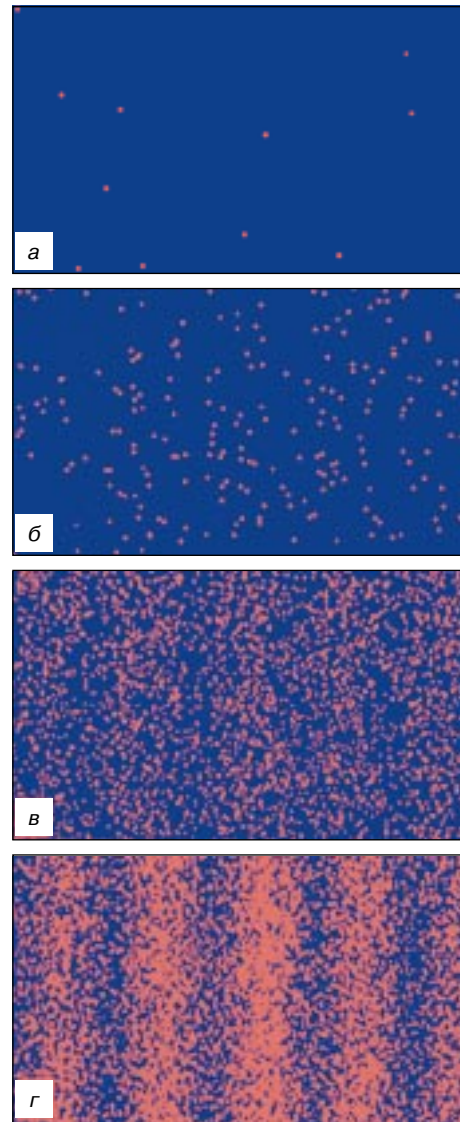


Рис. 1. Хорошим примером результата наблюдения свойств электрона является эксперимент [8], в котором проводился стандартный интерференционный опыт, где электроны проходили на детектор через отверстия в экране. На рисунке приведены распределения электронов за экраном с несколькими отверстиями. Хорошо видна зависимость характера распределения от числа электронов, прошедших через экран, – случайный характер распределения при малом числе электронов (а) и типичная интерференционная картина при большом числе электронов (г)

рассеяние электронов на кристалле окиси магния методом Дебая—Шерера при столь малой интенсивности электронного пучка, что одновременно через экспериментальную установку пролетал лишь один электрон (время пролета электрона было в $\sim 10^4$ раз меньше, чем среднее время между попаданием электронов на фотопластинку). При малом числе электронов их следы на фотопластинке носили случайный характер (аналогично рис. 1, *a*). Однако и в таких условиях суммарный след от попадания многих электронов на фотопластинку представлял собой типичные интерференционные кольца.

Этот эксперимент четко доказал, что отдельный электрон обладает волновыми свойствами.

В 30-е годы XX века были проведены эксперименты с другими микрочастицами: протонами, нейтронами, атомами и молекулами. Все эти эксперименты также позволили обнаружить волновые свойства указанных частиц.

Наконец надо отметить, что еще в 1928 году Дж. Гамов дал качественное и количественное объяснение процесса α -распада атомных ядер исходя из гипотезы де Бройля. Такой процесс был назван туннелированием α -частиц через барьер (см., например, [7]).

Заканчивая раздел, отметим, что вся совокупность различных экспериментальных данных полностью качественно и количественно подтверждает исходную идею де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме природы микрочастиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вернемся к введению и сформулируем, какие изменения в фундаментальных законах естествознания про-

изошли в результате появления гипотезы де Бройля и ее экспериментального подтверждения. Эти изменения носят принципиальный характер. Оказалось, что как двузначная аристотелева логика, так и принцип причинности, то есть детерминизм в целом, не являются всеобщими закономерностями. Они верны в макромире и оказываются неверными в микромире. Это утверждение следует из корпускулярно-волновой природы микрочастиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багров В.Г. Открытие неклассической логики // Соросовский Образовательный Журнал. 2000. Т. 6, № 7. С. 72–78.
2. Крайнов В.П. Взаимоотношение между квантовой и классической физикой // Там же. 1998. № 4. С. 57–63.
3. Тернов И.М., Жуковский В.Ч., Борисов А.В. Квантовая механика и макроскопические эффекты. М.: МГУ, 1993.
4. Бройль Л. де. Революция в физике. М.: Атомиздат, 1963.
5. Гейзенберг В. Шаги за горизонт. М.: Прогресс, 1987.
6. Блохинцев Д.И. Принципиальные вопросы квантовой механики. М.: Наука, 1987.
7. Делоне Н.Б. Туннельный эффект // Соросовский Образовательный Журнал. 2000. Т. 6, № 1. С. 79–84.
8. Namiki M., Pascazio S. // Phys. Rep. 1993. Vol. 232. P. 301.

Рецензент статьи В.М. Липунов

* * *

Николай Борисович Делоне, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, ведущий научный сотрудник Института общей физики РАН. Область научных интересов – атомная и лазерная физика, оптика. Автор десяти монографий, из которых четыре опубликованы за рубежом, более 20 обзоров в отечественных и зарубежных журналах и более 150 научных работ.