

ВВЕДЕНИЕ

Основные этапы развития ядерной физики. Ядерная физика изучает структуру атомных ядер, свойства ядерных сил, законы изменения и превращения ядер при распаде и ядерных реакциях, взаимодействие ядерного излучения с веществом и элементарные частицы. Трудно указать другую область естествознания, столь же быстро развившуюся и получившую столь широкое применение в медицине, биологии, технике и энергетике, как ядерная физика. Многие ее новые открытия немедленно находят практическое приложение.

Изучение элементарных частиц непрерывно меняет и обогащает наши представления о свойствах материи. Все это определяет исключительно быстрое развитие ядерной физики.

Ее предыстория начинается в 1896 г., когда французский ученый Беккерель открыл, что соединения урана, независимо от их химического строения, самопроизвольно испускают лучи высокой проникающей способности. Тот же эффект наблюдался у открытого вскоре супругами Кюри элемента — радия.

Исследуя характер отклонения этих лучей в магнитном поле, Резерфорд показал, что они состоят из трех различных компонент: α -лучей — потока положительно заряженных частиц; β -лучей — потока частиц, заряженных отрицательно, и γ -лучей, не отклоняющихся в магнитном поле. Далее выяснилось, что α -лучи состоят из частиц, несущих двойной элементарный заряд и обладающих массой, приближенно равной массе атома гелия, в то время как β -лучи являются потоком быстро движущихся электронов, а γ -лучи ведут себя, как рентгеновские лучи большей жесткости.

Изучая рассеяние α -частиц в веществе, Резерфорд пришел к выводу, что в атоме, имеющем, как было ранее выяснено, размеры порядка 10^{-8} см, а масса сосредоточена в небольшой положительно заряженной сердцевине — в атомном ядре, поперечник которого имеет величину порядка всего 10^{-12} см, т. е. во много раз меньше размеров всего атома.

На основании этих опытов в 1911 г. Резерфорд предложил ядерную модель атома (в противовес существовавшей в то время модели Томсона, согласно которой атом рассматривался как положительно заряженный сплошной шар со взвешенными внутри него электронами). По этой ядерной модели атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра и в тысячи раз более легкой оболочки, образованной электронами. Электроны вращаются вокруг ядра и удерживаются вблизи него электрическими силами на расстояниях, которыми и определяется размер всего атома. Так как атомы электрически нейтральны, то атомный номер Z , определяющий заряд ядра и химические свойства элементов, равен числу электронов внешней оболочки.

Однако с точки зрения классической физики нельзя было объяснить существование стабильных атомов такой структуры, так как в соответствии с законами электродинамики всякий электрон, движущийся по окружности вокруг ядра, должен терять свою энергию на излучение, постепенно приближаться к ядру и в конце концов упасть на него. При этом должна непрерывно меняться частота обращения электрона вокруг ядра и, следовательно, частота испускаемого атомом излучения. В то же время было известно, что атомные спектры имеют строго определенный дискретный и стационарный характер.

Для устранения этих противоречий в 1913 г. Н. Бором была предложена модель атома, принципиально новым элементом которой по сравнению с моделью Резерфорда явилось наличие особых стационарных электронных орбит. По предположению Бора, их особенность заключается в том, что находящиеся на них электроны по некоторым неизвестным причинам не теряют энергию на излучение и обладают строго определенным моментом количества движения, кратным постоянной Планка — h :

$$2\pi m_e v r = n h,$$

где m_e — масса электрона, v — скорость электрона, r — радиус орбиты, n — целое число, называемое *главным квантовым числом* и принимающее значения $= 1, 2, 3, \dots$, а $h = 6,625 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек.

Переход же электрона с одной стационарной орбиты на другую (по Бору) должен сопровождаться поглощением или испусканием порции электромагнитной энергии в виде кванта света частоты ν и энергии

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где E_n и E_m — энергии электрона на n -й и m -й устойчивой орбите (в принципе возможно испускание и нескольких квантов той же суммарной энергии).

Эти два условия были введены в виде постулатов и на их основании были объяснены многие экспериментальные результаты. Однако в самой основе теории Бора была заложена непоследовательность. С одной стороны, он предполагал, что классические

принципы механики и электродинамики в общем правильны и электрон обладает обычными свойствами заряженной корпскулы. С другой стороны, утверждалось, что для электрона в атоме существуют некоторые исключения, необъяснимо противоречащие классическим представлениям.

Эта трудность была преодолена только после создания в 1926 г. Гейзенбергом и Шредингером последовательной теории — *квантовой механики*, основывающейся на более общих законах материи, которые в макромире сводятся к законам классической физики, но в микромире соответствуют совершенно новым свойствам частиц.

В частности, соответственно новым, волновым свойствам электрона, как показывает квантовая механика, не существует таких состояний частицы, в которых она обладала бы одновременно точно определенным положением и скоростью.

В таких условиях, когда отличие законов квантовой механики от законов классической физики становится существенным, например, для электрона в атоме, состояние его уже нельзя представлять как движение по определенной траектории — физические свойства частицы делают такое описание неадекватным. Вместо этого состояние следует описывать так называемой *волновой функцией*.

Для каждой конкретной системы она может быть найдена как решение фундаментального уравнения квантовой механики — волнового уравнения Шредингера. Оказывается, например, для электрона в атоме такое физически осмысленное решение существует только для выделенной последовательности значений энергии и момента количества движения. Эти «разрешенные», или «собственные», состояния и определяющие их «собственные значения» энергии и момента количества движения как раз и соответствуют состояниям, введенным Н. Бором. Однако при этом представление об орбитах электронов становится недействительным и отпадает. При данном состоянии электрона он может быть обнаружен не на некоторых орбитах, а с разной вероятностью во всем объеме атома. Вероятность обнаружения в данной точке определяется квадратом модуля волновой функции в данной точке.

Квантовая механика не только подтвердила ряд результатов теории Бора, но и сумела объяснить другие экспериментальные данные.

В 1919 г. Резерфорд наблюдал расщепление ядер различных веществ при бомбардировке их α -частицами. При этом из ядер вылетали однократно положительно заряженные частицы с массой, равной массе ядра атома водорода, в 1836 раз превышающей массу электрона. Этим было доказано, что в составе различных ядер содержатся ядра водорода; их называют протонами и обозначают символом p .

После открытия протонов физикам представлялось, что ядро построено из A протонов и $(A-Z)$ электронов. Протоны заряжены

положительно, следовательно, в единицах электронного заряда (взятого по абсолютной величине) заряд ядра равен $A - A + Z = Z$. Вокруг ядра вращается Z электронов в пределах расстояния порядка 10^{-8} см.

Но представление о том, что электроны входят в состав ядра, противоречило многим экспериментальным фактам.

В 1930 г. Боте и Беккер, подвергая бериллий воздействию α -частиц, излучаемых полонием, наблюдали излучение с большой проникающей способностью. Казалось, что это были γ -лучи.

Ирен Жолио-Кюри и Фредерик Жолио нашли, что если поместить на пути излучения парафин, то из парафина вылетают протоны большой энергии. Такой вид взаимодействия γ -излучения с веществом не был известен. Чтобы он мог существовать надо было бы приписать γ -лучам энергию, значительно большую, чем они могли иметь при подобных реакциях.

Только в 1932 г. Чадвик доказал существование электрически нейтральной частицы с массой, почти такой же, как у протона. Эта частица была названа нейтроном и обозначается символом n .

Сразу же после этого открытия независимо Гейзенбергом и Иваненко была высказана естественная гипотеза о том, что ядро построено из протонов и нейтронов, причем полное их число определяет массу ядра A , число одних протонов — заряд ядра Z . Возник вопрос, какие силы удерживают протоны и нейтроны в ядре, какова их природа.

Так как нейтрон не имеет заряда, эти силы не могут быть электрическими. Стало ясно, что кроме известных ранее *кулоновских и гравитационных* сил, должны существовать новые — *ядерные* силы. Возник вопрос о природе этих сил. С открытием нейтрона по существу начался новый этап в развитии науки о ядре.

В конце 1932 г. в космических лучах Андерсоном и Милликеном был открыт позитрон — частица с массой электрона, но положительно заряженная (e^+). Ее существование было предсказано Дираком из чисто теоретических представлений и обнаруженные свойства позитрона оказались точно соответствующими предсказанным.

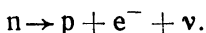
По мере изучения β -распада атомных ядер выяснились странности и нарушения в балансе энергии. Получалось видимое противоречие с наиболее общими законами природы — законом сохранения энергии и законом сохранения момента количества движения.

Было показано, что спектр излучаемых электронов имеет непрерывный характер, а их средняя энергия значительно меньше энергии, теряемой ядром при распаде. Выход был найден Паули, предложившим гипотезу о существовании **еще одной** нейтральной частицы с высокой проникающей способностью — нейтрино (символ ν). Такая частица, вылетая из ядра при β -распаде вместе с электроном, уносит дополнительную энергию, но из-за отсутствия заряда остается незамеченной. Эта гипотеза была принята всеми

и вошла в теорию, но существование нейтрино в свободном состоянии было обнаружено на опыте более чем через двадцать лет.

Для того чтобы на основе гипотезы о нейтрино построить последовательную теорию β -распада, Ферми предположил наличие нового типа взаимодействия частиц — так называемого β -взаимодействия (*слабое взаимодействие*).

Это взаимодействие согласно его теории обуславливало β -распад, т. е. распад нейтрона на протон, электрон и нейтрино



В 1934 г. советский физик И. Е. Тамм показал, что из факта существования такого распадного β -взаимодействия должно вытекать и существование некоторого потенциала сил между нейтроном и протоном. Механизм его заключается в том, что нуклоны (p , n) обмениваются парами частиц (электрон — нейтрино и т. п.). Отсюда возникла возможность объяснить природу ядерных сил. Однако, как показал сам Тамм, эти силы чрезвычайно слабы и не могут быть теми основными ядерными силами, которые обеспечивают устойчивость ядер.

В 1935 г. японский физик Юкава, развивая эти идеи, показал, что ядерные силы могут иметь в своей основе обмен какими-то другими частицами — квантами поля ядерных сил. При этом для объяснения малого радиуса ядерных сил нужно было предположить, что они должны иметь массу порядка 200—300 электронных масс.

В 1938 г. подобные частицы были открыты в космических лучах и получили название μ -мезонов. Однако изучение их свойств показало, что и они не могут быть переносчиками ядерного взаимодействия, так как сами слабо взаимодействуют с ядерными частицами.

Только в 1947 г. Пауэллом в космических лучах были обнаружены ядерно активные частицы — π -мезоны с массой порядка $270 m_e$, которые и являются квантами поля ядерных сил. Таким образом, было установлено, что в основе существования ядерных сил между нуклонами лежит взаимодействие через поле ядерных сил, квантами которого являются π -мезоны и некоторые другие, позже открытые виды мезонов.

Работы по изучению взаимодействий между нуклонами и ядрами развивались особенно интенсивно после открытия методов искусственного ускорения частиц. В 1932 г. Кокрофт и Уолтон построили установку, в которой получили пучок быстрых протонов. Бомбардируя такими ускоренными протонами мишени из различного вещества можно было наблюдать процессы расщепления ядер. Дальнейшее развитие ускорительной техники дало возможность получать также быстрые электроны, дейтоны, α -частицы и другие частицы. В руках физиков появилось мощное средство воздействия на атомное ядро.

С открытием в 1944 г. В. И. Векслером (СССР) и в 1945 г. Макмилланом (США) принципа автофазировки была начата разработка новых циклических ускорителей. В Советском Союзе с 1958 г. работает ускоритель с энергией частиц 10 Гэв. В 1960 г. в США получены на ускорителе частицы с энергией порядка 30 Гэв. Недавно (1968 г.) в СССР введен в строй новый ускоритель в Серпухове, в котором протоны ускоряются до энергий 76 Гэв.

В различных странах запланировано строительство еще более мощных ускорителей. Европейским центром научных исследований в Швейцарии (CERN) намечено строительство ускорителя на 300 Гэв. В США сооружается кольцевой ускоритель на 200 Гэв с возможностью в дальнейшем удвоения энергии. В СССР успешно прошла испытание модель ускорителя на 1000 Гэв. Для представления о размерах этой уникальной установки достаточно сказать, что периметр ускорительной камеры будет равен 20 км.

В 1939 г. Ган и Штрассман, облучая уран нейтронами, наблюдали образование нескольких более легких элементов. Мейтнер и Фриш предложили правильную интерпретацию результатов, полученных Ганом и Штрассманом и показали, что тяжелое ядро под действием нейтронов может разделиться на две примерно равные части. В дальнейшем было показано, что процесс деления сопровождается испусканием вторичных нейтронов и освобождением большого количества энергии. Так как отношение среднего числа вторичных нейтронов к числу первичных превышает единицу, появилась возможность реализовать цепную реакцию, т. е. повторять процесс деления на новых ядрах урана с экспоненциальным нарастанием потока нейтронов. Первый ядерный реактор, в котором получалась энергия за счет деления ядер, был построен Ферми в США в 1942 г. Темпы развития этой отрасли науки таковы, что уже через 12 лет (в 1954 г.) в СССР была запущена первая в мире промышленная атомная электростанция.

За последние 25 лет развитие наших представлений о структуре ядер, об элементарных частицах, о свойствах ядерных сил происходило весьма быстро.

Эксперименты были направлены на наблюдение ядерных процессов при все больших энергиях путем использования мощных ускорителей и усовершенствования методов изучения космических лучей, в составе которых имеются частицы огромной энергии вплоть до 10^{19} эв. Так, в подтверждение теории Дирака были найдены античастицы, соответствующие известным элементарным частицам: в 1955 г. — антипротон, а в 1956 г. — антинейтрон.

Мир элементарных частиц непрерывно расширял свои границы: были открыты гипероны — частицы с массой, большей массы протона; было обнаружено существование двух различных типов нейтрино: нейтрино электронных и нейтрино мюонных. Огромное значение для науки имело открытие несохранения четности в слабых взаимодействиях и спиральности нейтрино.

В настоящее время обнаруживаются все новые и новые частицы, относящиеся к классу так называемых *резонансов*, со временем жизни порядка $10^{-22} \div 10^{-23}$ сек, распадающихся на несколько известных ранее частиц с гораздо большим временем жизни.

В последние годы произошел качественный сдвиг в понимании того, что такое элементарная частица. Опыты развеяли старое представление об элементарной частице, как о чем-то вечном, неизменном и неразделимом. Оказалось, что все элементарные частицы могут рождаться и умирать, превращаясь в другие элементарные частицы. Частицы могут превращаться в излучение, и, наоборот, световые кванты могут порождать частицы. Оказалось, что элементарные частицы сами обладают сложной структурой.

Таким образом, родилась физика элементарных частиц. В настоящее время их известно уже более 200. Пока еще не существует строгой единой теории элементарных частиц, хотя накоплено много экспериментальных фактов. Каждый день приносит новые сведения и расширяет наши познания о природе явлений в мире атомных ядер и элементарных частиц.

Масштабы физических величин. Исследования явлений в микромире показывают, что атомы и элементарные частицы подчиняются закономерностям, в значительной мере отличающимся от закономерностей макромира. В известной степени это связано с переходом к другим масштабам размеров, скоростей, энергий и прочих физических величин.

Вместе с тем не следует думать, что макромир и микромир разделены строгой и нерушимой границей, по одну сторону которой действуют одни законы, а по другую — другие.

Все законы, действующие в микромире, распространяются и на макромир, но благодаря другому масштабу объектов форма этих законов и особенности их использования изменяются и переходят в обычные, хорошо известные закономерности макромира. Иными словами, законы макромира являются частными или предельными случаями более общих законов микромира, которые для объектов макромира дают несущественные поправки к результатам классической механики.

Рассмотрим масштабы величин, характерных для мира элементарных частиц.

Длина. Поперечник атома имеет порядок 10^{-8} см (10^{-8} см = = 1 Å). Эта величина характеризует радиус орбиты наружных электронов. Сто миллионов атомов, выстроенных в ряд, займут всего 1 см. Размеры ядра в $10^4 \div 10^5$ раз меньше размеров атома и по порядку величины равны $10^{-12} \div 10^{-13}$ см. Расстояние 10^{-13} см получило название 1 Ферми. В проведенных до настоящего времени экспериментах удалось различать расстояния до 0,1 Ферми, или 10^{-14} см.

Энергия. Средняя кинетическая энергия теплового хаотического движения атомов и молекул может служить своего рода эталоном для сравнения энергий. При обычной температуре молекула

движется в среднем с кинетической энергией, составляющей примерно $1/40$ электрон-вольт (эв).

Напомним, что один электрон-вольт соответствует энергии, приобретаемой или теряемой частицей с единичным электрическим зарядом при прохождении ею разности потенциалов в 1 в.

Очевидно, что в системе CGSE

$$1\text{эв} = 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1}{300} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг.}$$

(Заметим, что сам эрг в макромире является довольно мелкой единицей. Она соответствует энергии движения жука весом 2 г, ползущего со скоростью 1 см/сек. Одна калория составляет около 40 млрд·эрг.)

Более крупными единицами энергии являются мегаэлектрон-вольт — 10^6 эв ($M\text{эв}$) и гигаэлектрон-вольт 10^9 эв ($G\text{эв}$)

$$1 M\text{эв} = 10^6\text{эв} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ эрг.}$$

Энергия связи протонов и нейтронов в ядре равна в среднем $8 \cdot 10^6$ эв. В ускорителях частицы приобретают значительно большие энергии, порядка $10^9 \div 10^{10}$ эв. А некоторые частицы космического излучения несут энергии ($10^{12} \div 10^{19}$) эв, что уже имеет порядок ($1 \div 10^7$) эрг.

Скорости. Абсолютным пределом скоростей всех движений является скорость света: никакие сигналы, никакие тела не могут обладать скоростью, превышающей скорость света в вакууме:

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек.}$$

Со скоростью света распространяются электромагнитные волны и не имеющие массы нейтрино. Другие элементарные частицы, обладающие массой, могут иметь скорость, сколь угодно близкую к скорости света, но всегда меньше ее. Эти опытные данные положены в основу теории относительности. Приведем в качестве примера расчет скоростей, с какими будет двигаться электрон, если его энергия увеличивается в ускорителе от 1 млн до 1 млрд эв.

Теория относительности позволяет рассчитать кинетическую энергию частицы, движущейся со скоростью, сравнимой со скоростью света:

$$T = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_e c^2,$$

где m_e — масса покоя электрона.

Подставляя сюда энергии $T=10^6$ и 10^9 эв, мы видим что при кинетической энергии в 10^6 эв (1 Мэв) скорость электрона составляет более 94% от скорости света, а при энергии 10^9 эв (1 Гэв) скорость электрона лишь на половину миллионной доли отличается от скорости света.

Скорость протона, частицы в 1836 раз более тяжелой, при кинетической энергии в 10^9 эв, равна 85% скорости света.

Иначе говоря, скорости элементарных частиц могут быть сравнимы со скоростью света, с чем никогда не приходится встречаться в макромире. Скорость света и выбирают в качестве величины, характеризующей масштаб скоростей в микромире.

Время. В мире, где расстояния измеряются в единицах Ферми, а скорость — в долях скорости света, масштаб времени протекания явлений должен существенно отличаться от привычного нам. Если поделить 10 Ферми на скорость света, т. е. оценить примерно, за какое время частица, двигаясь со скоростью света, пересечет ядро по диаметру, то полученная величина будет равна

$$\frac{10 \cdot 10^{-13}}{3 \cdot 10^{10}} \approx 3 \cdot 10^{-23} \text{ сек.}$$

Время 10^{-23} сек иногда называют *ядерным временем*, им и определяется временной масштаб в мире элементарных частиц.

М а с с а. Масса m отражает инертные и гравитационные свойства частиц. Массой определяется также имеющийся в частице запас энергии. Согласно теории относительности полная энергия тела, движущегося со скоростью v , равна

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

При $v \ll c$, разложив по степеням v/c , получим

$$E \approx \frac{m_0 v^2}{2} + m_0 c^2.$$

Полная энергия тела складывается, таким образом, из кинетической энергии и энергии покоя. Тело с массой покоя m_0 обладает запасом так называемой собственной энергии E_0 , связанной с массой покоя соотношением $E_0 = m_0 c^2$.

За единицу массы элементарных частиц принимают массу покоя электрона m_e , равную $9 \cdot 10^{-28}$ г. Если ее выразить в энергетических единицах, то массе покоя электрона соответствует собственная энергия, равная

$$m_e c^2 = \frac{9 \cdot 10^{-28} \cdot 9 \cdot 10^{20}}{1,6 \cdot 10^{-6}} = 0,511 \text{ Мэв.}$$

Масса ядра и атома в ядерной физике измеряется в атомных единицах массы. За одну атомную единицу массы (ME) принимается $1/16$ часть массы нейтрального атома кислорода O (последнее время часто используется в качестве единицы также $1/12$ массы атома углерода C).

Чтобы выразить значение атомной единицы массы в граммах, надо взять обратную величину от числа Авогадро — N_A :

$$1ME = \frac{1}{16} \cdot \frac{16}{N_A} = \frac{1}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Момент количества движения. Квантовой единицей момента количества движения является величина \hbar :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6,625 \cdot 10^{-27}}{2\pi} = 1,054 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек.}$$

Электрон в атоме имеет величину момента количества движения порядка одного или нескольких \hbar . Для сравнения укажем, что шарик с массой в 1 г, движущийся по окружности в 1 см со скоростью 1 см/сек, имеет момент количества движения, равный 1 эрг·сек или примерно $10^{27} \hbar$.

Изменение момента при увеличении скорости вращения тела всегда должно быть кратным величине \hbar . Момент количества движения шарика может быть $(10^{27} - 1) \hbar$ или $(10^{27} - 2) \hbar$, но не может быть $(10^{27} - 1/3) \hbar$. Приращение момента количества движения при переходе от одного допустимого значения к другому настолько мало, что нет надежды обнаружить его в явлениях макромиира. Так, чтобы увеличить момент количества движения шарика на \hbar , надо увеличить его скорость на 10^{-27} см/сек, в то время, как для увеличения момента количества движения электрона на атомной орбите на \hbar надо его скорость увеличить вдвое.

Особенности физических явлений в микромире.

Дискретность (атомизм) в микромире. Основные свойства элементарных частиц, с которыми мы встречаемся в микромире, такие, например, как масса и заряд, являются неизменными признаками, характерными для каждого рода частиц. В существовании элементарных частиц с точно одинаковыми для данного рода частиц свойствами (в так называемой тождественности частиц) выражается атомизм, свойственный микромиру и составляющий его отличительную черту.

Сложные частицы, такие, например, как атомы, ядра атомов, поскольку они образуются из вполне определенных элементарных частиц, также обладают атомистическими свойствами. Для каждого типа сложных частиц, например для атомных ядер с данным числом протонов и данным числом нейтронов, существует последовательность вполне определенных возможных внутренних состояний, каждое из которых скачкообразно отделено от другого изменениями энергии и момента количества движения на определенную величину. Состояние с наименьшей возможной энергией называется основным или «нормальным» состоянием. Остальные состояния с большими энергиями называются возбужденными.

Для того чтобы перевести систему из основного состояния в возбужденное, необходимое, чтобы энергия внешнего воздействия

была равна разности в энергиях состояний или превышала ее, иначе по прекращении внешнего воздействия сложная частица останется в том же состоянии, в котором она была до воздействия.

Дискретность состояний сложных атомных систем является одной из важнейших особенностей микромира. Экспериментально эта дискретность доказывается прямыми опытами, например известными из курса атомной физики опытами Франка и Герца по упругому и неупругому рассеянию электронов, или опытами Штерна и Герлаха, измеривших магнитные моменты атомов.

В последнем случае было показано, что существует только определенные, дискретные ориентации магнитного момента относительно внешнего магнитного поля. Поскольку магнитный момент связан с вращением атомов, опыты Штерна и Герлаха доказывают, что вращательный импульс или момент количества движения атома тоже может иметь только дискретные значения.

Дискретность, или, как иногда говорят, квантованность, проявляется и во многих других случаях и является типичным свойством физических величин в микромире.

Дуализм: частицы — волны. Основным новым физическим свойством частиц микромира, определяющим особенности поведения этих частиц, является одновременное наличие у одной и той же частицы и дискретных и волновых свойств. Такой, как говорят, корпускулярно-волновой дуализм был обнаружен в начале XX в. у электромагнитного излучения — света, а в 1925 г. — у электронов.

В начале XX в. М. Планк, исследуя законы излучения абсолютно черного тела, пришел к выводу, что тела могут излучать энергию только определенными порциями — квантами. Такое ограничение никак не вытекает из основ классической физики. Согласно теории Планка энергия кванта определяется формулой

$$E = h\nu, \text{ или } E = \hbar\omega, \quad (1)$$

где ν — частота излучения, $\omega = 2\pi\nu$ — круговая частота, h — постоянная Планка ($\hbar = h/2\pi$).

Несколько лет спустя А. Эйнштейн обнаружил, что своеобразные и несогласующиеся с классическими законами физики свойства фотоэлектрического эффекта (явления, при котором электромагнитное излучение поглощается в атоме и вызывает вылет электрона с оболочки атома) находят естественное объяснение, если допустить существование фотона — корпускулы электромагнитного излучения со строго определенными энергией и импульсом, определяемыми длиной световой волны

$$E = h\nu; \quad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

где λ — длина волны света. Другими словами, Эйнштейн допустил, что излучение не только испускается определенными порциями —

квантами, но и в дальнейшем существует и поглощается в виде этих обособленных порций.

Гипотеза фотонов просто объясняла две главные особенности фотоэффекта: зависимость числа выбитых электронов от интенсивности светового потока и зависимость энергии каждого электрона от частоты световых волн, тогда как разработанная ранее волновая теория не могла дать этому объяснения (подробнее эффект фотоэлектрического выбивания электронов будет рассмотрен в гл. 4). Измерения частоты падающих световых волн и энергии выбитых электронов позволили определить величину постоянной h и подтвердить соотношение (1) между энергией и частотой фотона.

Через 25 лет де Бройль выдвинул гипотезу, дополняющую этот закон: всякая частица обладает волновыми свойствами; каждой частице с импульсом p можно поставить в соответствие некоторую волну с длиной λ , частотой ν и волновым числом $k = 2\pi/\lambda$. Соотношение де Бройля можно записать в следующем виде:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (2)$$

Если масса покоя частицы m_0 , то ее энергия равна

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 p^2} = \sqrt{m_0^2 c^4 + \frac{c^2 h^2}{\lambda^2}}.$$

Импульс p является корпускулярной характеристикой частиц, а λ — волновой. Обе характеристики связаны между собой соотношением де Бройля (2) посредством постоянной Планка h . Благодаря малости постоянной h длины волн для макроскопических тел ничтожно малы и наличие их не может быть замечено. Таким образом, волновые свойства частиц проявляются только в микромире.

Первое подтверждение этой гипотезы было получено в опытах по дифракции электронов на кристаллах. Опыты по дифракции и интерференции такого типа являются наиболее убедительным и прямым доказательством наличия волновых свойств у частиц. Впоследствии они были осуществлены также с молекулами и нейтронами.

Наиболее полно аналогия явления дифракции и интерференции частиц с такими же явлениями в оптике проявляется лишь в том случае, когда размеры систем, с которыми эти частицы взаимодействуют, соизмеримы с дебройлевской длиной волны; например, для нейтрона, движущегося с тепловой скоростью, равной $2 \cdot 10^5$ см/сек, длина волны де Бройля равна 1 \AA , или 10^{-8} см, что близко к размерам постоянной кристаллической решетки.

С точки зрения классической механики свойства частицы и свойства волны взаимно исключают друг друга. Поэтому развитие

новых представлений потребовало новой физической теории, которая получила название квантовой или волновой механики.

Дальнейшее развитие вопроса о дуализме материи привело к созданию квантовой теории поля, которая обобщает выводы о корпускулярной и волновой природе частиц. Она основана на положении, что любому полю сил можно сопоставить кванты этого поля. Так, например, световые кванты являются теми частицами, которые создают электромагнитное поле. Создание в пространстве волнового электромагнитного поля на языке корпускулярного аспекта теории соответствует испусканию фотонов. Интенсивность волнового поля в данной точке (квадрат амплитуды волны) пропорциональна плотности потока фотонов или вероятности их обнаружения в этой точке. Аналогичный смысл имеют волны де Бройля: их интенсивность определяет вероятность обнаружения частицы в данной точке. Последовательная теория этих волн была создана Шредингером.

Волновое поле частиц, описываемое функцией координат и времени $\Psi(x, y, z, t)$ для каждой данной системы, т. е. для каждого данного потенциального поля, может быть найдено из решения уравнения, носящего название уравнения Шредингера: для стационарных состояний (состояний, не зависящих от времени) оно имеет вид

$$H\Psi = E\Psi, \quad (3)$$

где $H = -\frac{\hbar}{2m} \Delta + U(x, y, z)$ — так называемый гамильтониан, или оператор гамильтона, в котором

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$$

$U(x, y, z)$ — потенциальная энергия частицы, находящейся в точке (x, y, z) , E — полная энергия.

Решением этого дифференциального уравнения и является волновая функция $\Psi(x, y, z)$, квадрат модуля которой $|\Psi|^2$ определяет вероятность обнаружить частицу в точке (x, y, z) . При этом если потребовать, чтобы решение имело физический смысл (было бы однозначно, непрерывно и имело непрерывные первые производные), то при применении уравнения Шредингера к атому водорода автоматически получаются постулаты Бора¹.

Для случая свободной частицы связанная с ней плоская волна де Бройля описывается волновой функцией вида

$$\Psi = A e^{2\pi i(\vec{k} \cdot \vec{r} - vt)} = A e^{2\pi i(xk_x + yk_y + zk_z - vt)},$$

она может быть получена из решения общего уравнения Шредингера для нестационарного случая, отличающегося от (3) заменой

¹ Подробно модель атома Бора описана в курсе атомной физики, например в книгах Борна [2] и Шпольского [6].

E на $-\frac{\hbar d}{i dt}$, где k и ν обозначают волновое число и частоту, которые связаны с энергией и импульсом уравнениями

$$\nu = \frac{E}{\hbar}; \quad k = \frac{1}{\lambda} = \frac{p}{\hbar}.$$

Решения Ψ , удовлетворяющие условиям конечности непрерывности и однозначности получаются только при определенном дискретном ряде значений энергии (входящей в уравнение в качестве параметра). Такие значения энергии называются *собственными значениями*. Все решение определяется квантовыми числами n, l, m , где n — принимает целые значения и эквивалентно главному квантовому числу Бора. Оно характеризует энергию состояния. Число l при данном n может равняться $0, 1, \dots, (n-1)$ и называется *орбитальным квантовым числом*; оно определяет величину момента количества движения электрона на орбите. Число m_l совпадает с магнитным квантовым числом, определяющим величину проекции этого вектора на выбранное направление.

Первоначально Шредингер предпринял попытку истолковать корпускулы, и в частности электроны, как волновые пакеты. Эта попытка потерпела неудачу: пакеты с течением времени расплываются¹ и могут даже разделиться на две части, а необходимым признаком элементарных частиц является их неделимость. Так, электрон не может в процессе дифракции разделиться на части, тогда как волна, например, на границе двух сред разделяется на отраженную и преломленную.

Если же целостность частиц при таких процессах, как отражение, должна сохраняться, то частица либо отразится, либо пройдет во вторую среду. Соответственно этому связь между волнами и частицами получила статистическое истолкование: квадрат амплитуды волны в данном месте, измеряющий ее интенсивность, есть мера вероятности обнаружить частицу в этом месте². С позиций такого истолкования весь ход событий в физической микросистеме определяется вероятностными законами.

Соотношение неопределенности. Наличие волновых свойств у микрочастиц неизбежно должно внести какие-то ограничения в применимость понятий и параметров, которые характеризуют частицу в классической физике.

В классической механике всякая частица в любой момент времени занимает строго определенное место в пространстве и обладает определенным импульсом. Состояние системы частиц полностью характеризуется совокупностью их координат и импульсов.

¹ Подробное объяснение можно найти в книге Д. И. Блохинцева [3].

² Квадрат модуля берется по той причине, что, как и в случае света, он является мерой интенсивности. При этом учитывается, что сама волновая функция комплексная, в то время как величины, допускающие физическую интерпретацию, должны быть вещественными.

Существование волновых свойств вносит значительное ограничение в возможность такого описания системы микрочастиц.

Свободная частица, движущаяся с постоянной скоростью, описывается волной с постоянной частотой и амплитудой, так называемой монохроматической волной, имеющей бесконечную протяженность. Это означает, что свободную частицу с равной вероятностью можно обнаружить в любой точке безграничного пространства. Действительно, синусоидальные колебания, создаваемые бегущей волной

$$\Psi = A \sin 2\pi \left(\nu t - \frac{x}{\lambda} \right),$$

имеют место в любой точке x .

Однако наличие корпускулярных свойств требует, чтобы частицу можно было локализовать в пространстве и времени. Если же микрочастица описывается волновой функцией, сосредоточенной в малой области пространства Δx , т. е. если положение частицы определено с точностью Δx , то это означает, что соответствующая ей волна уже не может быть монохроматической. Действительно, из теории рядов Фурье известно, что, взяв сумму синусоид и косинусоид с различными ν , можно добиться того, чтобы результирующая функция Ψ имела любое требуемое распределение в пространстве, например, чтобы она была равна нулю всюду, кроме ограниченной области. Полученная таким образом функция Ψ будет показывать, что частица заведомо находится внутри этой ограниченной области. Чем меньше пространство, в котором «заперта» частица, тем больший набор разнообразных плоских волн нужно взять, чтобы получить Ψ -функцию, выражающую такое распределение вероятности. Но по формуле де Бройля (3) разные длины волн соответствуют разным скоростям частицы. Взяв набор длин волн, мы уже не сможем сказать, какова именно скорость частицы. Следовательно, чем в меньшем объеме локализована частица, тем менее определена ее скорость. Можно строго показать, что неопределенности в положении (Δx) и в скорости вдоль той же оси (Δv_x) связаны соотношением

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \frac{h}{2\pi m}.$$

Его также можно записать в виде

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar. \quad (4)$$

Оно носит название соотношения неопределенности Гейзенберга¹.

Из этого соотношения следует, что если частица находится в состоянии, в котором неопределенность ее положения Δx мала,

¹ Строгий вывод соотношения неопределенности можно найти в книгах Д. И. Блохинцева [3], Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [4].

то неопределенность ее импульса Δp должна быть велика, и наоборот. Таким образом, в квантовой механике утрачивается привычное для классической физики представление о траектории частицы.

Указанная особенность механики микрочастиц не связана с какой-либо непознаваемостью микромира или неполноценностью современной теории; дело лишь в том, что к микрочастицам неприменимы многие представления классической физики, и в частности ограничение на применимость понятия координаты и импульса к миру элементарных частиц определяется написанным соотношением неопределенности.

Пока физика ограничивалась исследованием процессов, в которых участвуют тела с относительно большой массой, нельзя было заметить волновые свойства тел и в силу малости \hbar нельзя было в опытах почувствовать ограничений, налагаемых соотношением неопределенности.

Приведем простой расчет. Положим, что положение нашего шарика массой в 1 г задано с максимальной практически возможной еще точностью в 10^{-5} см. Тогда из соотношения неопределенности следует, что

$$\Delta v = \frac{\hbar}{m \cdot \Delta x} \approx \frac{10^{-27}}{1 \cdot 10^{-5}} \approx 10^{-22} \text{ см/сек},$$

т. е. неопределенность в значении скорости тела такова, что она лежит далеко за пределами практически возможной точности ее измерения.

Применим теперь это же соотношение к определению координаты электрона, масса которого равна $9 \cdot 10^{-28}$ г. Допустим, что нужно определить его положение с точностью до размеров атома, чтобы можно было установить, к какому атому он относится. В этом случае $\Delta x \approx 10^{-8}$ см.

Тогда

$$\Delta v = \frac{10^{-27}}{9 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{-8}} \approx 10^8 \text{ см/сек}.$$

Но в атоме электрон в среднем имеет кинетическую энергию порядка 10 эв, что как раз соответствует 10^8 см/сек. Таким образом, в этом случае неопределенность Δv имеет тот же порядок, что и средняя величина скорости v .

Может возникнуть вопрос: как же тогда согласовать фотографии в камере Вильсона или следы в ядерной эмульсии, на которых видны пути частиц, с соотношением неопределенности, которое не вяжется с представлением о траектории микрочастиц? Здесь нужно принимать во внимание то, что след частицы определяет ее местоположение не точно, а лишь в пределах толщины следа (или размеров капельки тумана в камере Вильсона). Это характеризует неопределенность в координате частицы. Размеры капелек имеют порядок 10^{-4} см, т. е. $\Delta x = 10^{-4}$ см.

Тогда для электрона $\Delta p = 10^{-23}$, а $\Delta v = 10^4$ см/сек. При больших энергиях Δp будет очень мала по сравнению с p , и частица в указанных пределах точности будет вести себя, как классическая частица.

Помимо соотношения неопределенности для координаты и импульса, в квантовой физике существует еще соотношение неопределенности для энергии E и времени t , которое записывается следующим образом:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar. \quad (5)$$

Соотношение (5) легко может быть получено из выражения (4), если учесть, что $E = \frac{p^2}{2m}$ и, следовательно, $\Delta E = \frac{p}{m} \Delta p = v \Delta p$, а $\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$.

Смысл этого соотношения может быть двоякий. Энергия системы, находящейся в возбужденном состоянии в течение времени Δt , не может иметь точного значения. Неопределенность величины энергии ΔE связана с временем Δt выражением (5). Величина ΔE называется *шириной возбужденного уровня*. Время Δt , в течение которого атом находится в возбужденном состоянии, называется средним временем жизни. Чем меньше среднее время жизни атома в данном состоянии, тем больше неопределенность в энергии этого состояния.

Во-вторых, производя измерение энергии системы за время Δt , мы не можем получить значение энергии с вероятной ошибкой, меньшей $\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t}$. Это истолковывается так же, как возможность отклониться от закона сохранения энергии на величину ΔE за время Δt . Более подробно с примерами использования соотношения неопределенности мы будем встречаться в дальнейшем.

Момент количества движения и спин. Вращательное движение частицы в классической механике принято характеризовать моментом количества движения, который определяется как векторное произведение радиуса вектора, соединяющего частицу с центром вращения, на импульс частицы:

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{p}].$$

Эта величина в механике является *интегралом движения* в поле центральных сил. В простом случае, когда частица движется по окружности радиуса r с постоянной скоростью v , численное значение момента количества движения равно

$$M = mvr,$$

и в классической механике эта величина может принимать любые значения. В микромире же согласно законам квантовой механики момент количества движения микрочастицы «квантуется». Он может принимать определенные дискретные значения, пропорцио-

нальные постоянной Планка \hbar [1]. Модуль его может принимать только значение

$$|\vec{M}| = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad (6)$$

где l называется орбитальным квантовым числом, имеющим в случае орбитального движения целочисленные значения 0, 1, 2, 3...

У квантовомеханического вектора не могут одновременно иметь точные значения все три его проекции на оси координат. Поэтому для момента количества движения одновременно могут иметь определенные значения только его модуль и одна проекция на выделенное в пространстве направление.

Эта проекция может принимать только целочисленные (в единицах \hbar) значения. Максимальное значение проекции на любое направление, например на ось z , равно

$$(M_z)_{\text{макс}} = \hbar l. \quad (7)$$

Величину остальных возможных проекций на то же направление можно получить, вычитая последовательно из $\hbar l$ по \hbar :

$$\hbar(l-1); \hbar(l-2) \dots 0; -\hbar; -2\hbar; \dots -\hbar l,$$

т. е. величина проекции момента количества движения может принимать всего $(2l+1)$ целочисленных значений от $\hbar l$ до $-\hbar l$.

В состоянии, в котором одна из проекций имеет определенное значение, другие две его проекции уже не имеют определенного значения, (кроме случая $l=0$, когда $M_x=M_y=M_z=0$).

В качестве примера на рис. 1 изображены возможные значения проекций вектора \vec{M} при $l=2$.

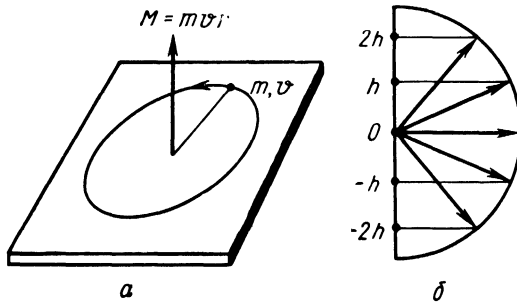


Рис. 1. Момент количества движения: а — в классической механике; б — возможные значения проекции (при $l=2$)

Из формул (6) и (7) видно, что величина максимальной проекции всегда меньше величины самого момента. Это означает, что момент количества движения микрочастицы никогда не бывает

ориентирован точно вдоль выбранного направления. Между ними всегда имеется некоторый угол. Это является следствием свойств квантовомеханического вектора. Действительно, если бы момент был ориентирован точно по выбранному направлению, то были бы одновременно известны все три его проекции (так как две из них равнялись бы нулю).

В отличие от классической физики в экспериментах с микро-частицами всегда измеряется не абсолютная величина момента количества движения M , а лишь одна из возможных его проекций, равная $\hbar l$.

Только при $l \gg 1$ величина проекции практически совпадает с значением момента количества движения и свойства микро-частицы приближаются к свойствам классической частицы.

В дальнейшем, для простоты, будем называть *орбитальным моментом количества движения* величину $\hbar l$, или в единицах \hbar , просто l . Следует иметь в виду, что в действительности эта величина равна максимальной проекции момента.

Кроме орбитального момента количества движения большинство микро-частиц обладают собственным моментом количества движения, абсолютная величина которого равна

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{S(S+1)},$$

Квантовое число S называют обычно спином частицы. Спин — столь же фундаментальный параметр частицы, как масса и заряд. Наличие спина можно связать с вращением частицы вокруг собственной оси; однако это лишь грубая аналогия с классическим волчком. В отличие от волчка частицу нельзя удержать от вращения и ее вращение нельзя ускорить. Спин — это неотъемлемое свойство частицы.

Максимальная проекция спина на любое направление, аналогично проекции орбитального момента, равна $\hbar S$. Величина максимальной проекции — $\hbar S$, в отличие от проекции орбитального момента — $\hbar l$, может равняться как целому, так и полуцелому числу (в единицах постоянной Планка \hbar).

Спиновое квантовое число S у разных частиц может иметь значение $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$ Для электрона, например, спиновое квантовое число S равно $\frac{1}{2}$. Это означает, что вектор спина электрона S имеет модуль, равный

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + 1 \right)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar.$$

Число возможных проекций спина определяется величиной, равной $(2S+1)$. Следовательно, для электрона существуют только два значения проекции спина на выбранное направление, равные соответственно $+\frac{1}{2}\hbar$ и $-\frac{1}{2}\hbar$.

Со спином связаны статистические свойства коллектива частиц данного типа или, как говорят, «статистика» [2]. Существуют

два различных вида статистики: статистика Бозе—Эйнштейна и статистика Ферми—Дирака. Основное их различие состоит в том, что в коллективе частиц, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака выполняется принцип Паули, согласно которому в каждом квантовом состоянии отдельной частицы в сложной связанной системе (ядро, атом) не может находиться одновременно более одной частицы.

Например, в атоме состояние каждого отдельного электрона приближенно задается при помощи четырех квантовых чисел: n , l , m_l , σ_s (напомним, что n —главное квантовое число, принимающее значения 1, 2, ..., характеризует энергию частицы в данном состоянии; l —азимутальное квантовое число, изменяющееся от 0 до $n-1$, характеризует момент количества движения частицы в пространстве; m_l —его проекция на заданное направление, принимающее значения $-l$, ..., $+l$, определяет ориентацию момента количества движения и σ_s —проекция спина на это же направление, равная или $-1/2 \hbar$, или $+1/2 \hbar$ и определяющая ориентацию внутреннего момента количества движения).

Принцип Паули констатирует, что в атоме не может быть двух электронов с одинаковыми значениями всех четырех квантовых чисел. Если два электрона имеют одинаковые n и одинаковые l , то они должны отличаться друг от друга либо направлением спина, либо проекцией орбитального момента, так что для них возможны не все, а лишь некоторые определенные значения m_l и σ_s .

Все частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми—Дирака и называются *фермионами*. Все частицы с целым спином подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна и называются *бозонами*. Для них принцип Паули не выполняется, но зато действует некоторое другое определенное ограничение на вид возможных состояний коллектива бозонов, а именно совокупная волновая функция такой системы не должна менять своего значения при перестановке двух частиц между двумя индивидуальными состояниями.

Полный момент количества движения частицы состоит из орбитального и спинового моментов, которые суммируются по правилам сложения квантовых векторов.

Так, например, для протона, спин которого равен $1/2 \hbar$, полный момент j может равняться либо сумме орбитального момента и спина:

$$j = l + \frac{1}{2},$$

если они направлены в одну сторону, либо разности этих величин

$$j = l - \frac{1}{2},$$

если они направлены в противоположные стороны (рис. 2). Этот результат является следствием квантовых свойств спина, так как именно в силу этих свойств проекция спина на направление орбитального момента может равняться только $+1/2 \hbar$.

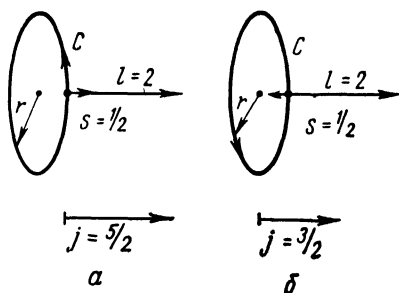


Рис. 2. Полный момент количества движения протона: *а* — при совпадении направлений орбитального момента и спина; *б* — при противоположных направлениях орбитального момента и спина (при $l=2$)

Полный момент количества движения протона обладает всеми свойствами механического момента микрочастицы. Величина проекции этого момента на любое направление в пространстве может принимать $(2j+1)$ значений, отличающихся друг от друга на \hbar , от $+j\hbar$ до $-j\hbar$.

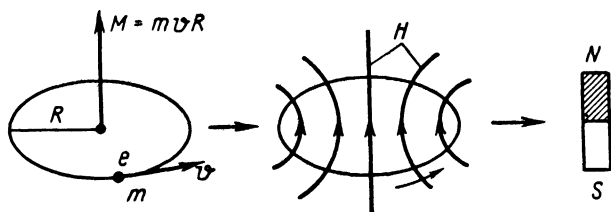


Рис. 3. Магнитный момент заряженной частицы, движущейся по круговой орбите

Магнитный момент. У заряженных частиц, имеющих механический момент количества движения \vec{M} , согласно классической электродинамике, должен существовать и магнитный момент $\vec{\mu}$. Допустим для простоты, что заряженная частица движется по круговой орбите. Тогда ее движение эквивалентно наличию элементарного тока $I=ev$, где e — заряд частицы, а v — частота обращения (рис. 3).

Величина магнитного момента μ , создаваемого током I , равна

$$\mu = \frac{1}{c} I \pi R^2,$$

где R — радиус орбиты. Умножая и деля правую часть этого выражения на массу частицы m и подставив $I = ev$, получим:

$$\mu = \frac{e}{mc} \pi R^2 v m,$$

или

$$\mu = \frac{e}{2mc} \cdot m 2\pi R^2 v.$$

Так как $v = 2\pi R v$, то величина $m 2\pi R^2 v$ представляет собой механический момент количества движения частицы M , т. е.

$$\mu = \frac{e}{2mc} M. \quad (8)$$

Следовательно, магнитный момент заряженной частицы всегда пропорционален ее механическому моменту. Поскольку механический момент частиц в квантовой механике определяется выражением (6), то численное значение модуля вектора магнитного момента, обусловленного орбитальным движением частицы, должно быть равно

$$\mu_l = \frac{e}{2mc} \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

а проекция магнитного момента $\vec{\mu}_l$, возникающего за счет орбитального движения электрона, всегда антипараллельна орбитальному моменту количества движения \vec{l} и численно равна

$$\mu_{lz} = l \frac{e\hbar}{2m_e c} = l M_B. \quad (9)$$

Величина M_B , определяемая константами e , \hbar , c , m_e , называется *магнетоном Бора*, она равна $9,27 \cdot 10^{-21}$ эрг/гс.

Ввиду того что частицы обладают помимо орбитального также собственным моментом, должен появиться еще дополнительный магнитный момент μ_s , связанный с этим видом вращения. Однако выше уже говорилось, что происхождение спина нельзя объяснить простым вращением заряженного шарика электрона вокруг своей оси. Поэтому нельзя ожидать, что здесь будет справедливо соотношение (8). И действительно, из опыта было найдено выражение, отличающееся от (8) в два раза:

$$\vec{\mu}_s = \frac{e}{m_e c} \vec{S}. \quad (10)$$

Объяснение этого соотношения было получено в релятивистской квантовой механике Дирака. Учитывая, что максимальная проекция $S_z = 1/2\hbar$, находим, что величина μ_S также численно равна магнетону Бора:

$$\mu_S = \frac{e\hbar}{2m_e c} = M_B.$$

Если выражать магнитный момент электрона в магнетонах Бора, а механический момент вращения в единицах \hbar , то можно записать:

$$\mu = gM.$$

Коэффициент g называется *гиромагнитным отношением*. Как видно из формул (9) и (10), для орбитального движения электрона оно равно единице ($g_l = 1$), а для спинового движения двум ($g_s = 2$). Полный магнитный момент частицы получается сложением магнитных моментов, возникающих за счет ее орбитального и спинового движений:

$$\vec{\mu}_j = \vec{\mu}_s + \vec{\mu}_l.$$

Если направление вектора магнитного момента параллельно вектору механического момента $\vec{\mu} \uparrow \uparrow \vec{M}$, то считают значение μ положительным: $\mu > 0$, если они антипараллельны $\vec{\mu} \uparrow \downarrow \vec{M}$, то $\mu < 0$.

Если частицу, обладающую спиновым магнитным моментом, поместить в магнитное поле, то спин и ее ось «вращения» могут быть ориентированы только в нескольких определенных направлениях. Мы уже говорили, что для частицы со спином, равным половине, возможны только две ориентации: в данном случае либо вдоль поля, либо против поля (рис. 4, а). Для частицы со спином, равным единице, возможны три ориентации оси вращения относительно магнитного поля: либо по полю (проекция $S_z = 1$), либо против поля (проекция $S_z = -1$), либо перпендикулярно полю ($S_z = 0$), если при этом считать, что направление магнитного поля совпадает с направлением оси z (рис. 4, б).

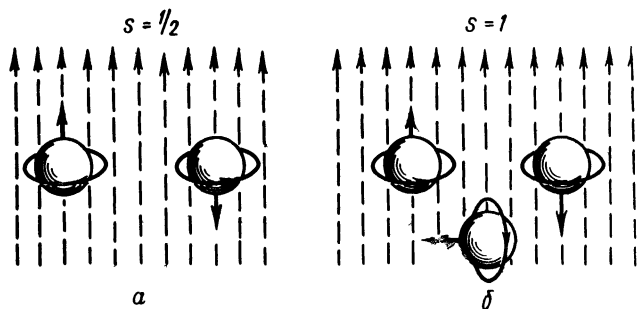


Рис. 4. Возможная ориентация частиц во внешнем магнитном поле: а — при $S = 1/2$; б — при $S = 1$