

что такой развал возможен, а это весьма сомнительная идея. Заметим, что собственная электростатическая энергия частицы равна работе, которая будет совершена при разделении этой частицы на составные «части». Пользуясь этим определением, мы и получаем, что электростатическая энергия любой системы зарядов равна интегралу от квадрата напряженности электрического поля, взятому по всему пространству. Но если частица *не может быть* разделена, представление о собственной электростатической энергии становится сомнительной идеей. Это в еще большей степени относится к бессмысленной бесконечно большой собственной энергии «точного электрона».

В настоящее время большинство физиков уже понимает, что попытки создать какую-либо классическую модель электрона не имеют смысла. Электрон не ведет себя подобно заряженной сфере, и поэтому все рассуждения о том, что удерживает его в объеме этой сферы или чему равна его классическая собственная энергия, не относятся к делу. Наши «классические предрассудки» заставляют нас ставить вопросы, на которые нельзя ожидать разумных ответов. Следует, однако, заметить, что, как это ни удивительно, дух бесконечно большой собственной энергии не полностью покинул физику, остатки этой путаницы еще существуют в квантовой механике.

Пределы применимости классической теории

20. В специальной теории относительности скорость света, равная $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, имеет первостепенное значение. Это верхний предел для скорости любой материальной частицы и для скорости распространения энергии или любой информации в физическом пространстве. Скорость света c дает нам простой и естественный критерий, с помощью которого можно решить, каково физическое явление — «нерелятивистское» или «релятивистское». Грубо говоря, нерелятивистский подход справедлив, т. е. дает достаточно точные результаты, в тех случаях, когда все относящиеся к задаче скорости малы по сравнению со скоростью света.

Можно спросить, существует ли аналогичный критерий, показывающий, в каких случаях надо использовать квантовую механику и когда можно ограничиться классическими теориями, т. е. существует ли другая мировая постоянная, «аналогичная» скорости света, с помощью которой можно сформулировать этот критерий? Такая постоянная существует и называется *постоянной Планка*. Значение постоянной Планка (ее обозначают буквой h) равно

$$h = 6,626 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Физическая размерность постоянной Планка равна
 (время) \times (энергия) =
 = (длина) \times (импульс) = (момент импульса).

Величина с такой размерностью называется *действием*, и постоянную Планка называют также элементарным *квантом действия*.

Интересующий нас грубый критерий заключается в следующем. Если в данной физической системе численное значение некоторой «естественной» динамической переменной *) с размерностью действия сравнимо с постоянной Планка h , то поведение этой системы описывается в рамках квантовой механики. С другой стороны, если все переменные, имеющие размерность действия, очень велики по сравнению с h , то систему с достаточной точностью описывают законы классической физики.

Подчеркиваем *приближенный* характер высказанного критерия, который лишь указывает, когда следует проявить осторожность. Малость переменной действия не всегда свидетельствует о *полной* неприменимости классической теории. Во многих случаях она может дать нам некоторое качественное представление о поведении системы, которое можно уточнить с помощью квантовомеханического рассмотрения.

21. Отметим сразу же, что постоянная Планка «мала», а это значит, что в единицах, установленных для описания макроскопических явлений, например в единицах СИ или СГС, она выражается малым числом. Таким образом, величины макромира, имеющие размерность действия, в единицах h выражаются *огромными* числами.

Рассмотрим, например, маятник часов. Чтобы найти величину с размерностью действия, образуем произведение периода маятника на максимальное значение его полной энергии. Период маятника близок к 1 с, а кинетическая энергия во всяком случае больше 1 эрг. Таким образом, произведение обеих величин $> 10^{26} h$, т. е. гораздо больше h . Согласно нашим критериям классическое описание движения маятника должно быть полностью справедливым.

Рассмотрим таким же образом вращающееся тело. Пусть его момент инерции равен $1 \text{ г} \cdot \text{см}^2$, а угловая скорость равна 1 рад/с. Тогда момент импульса будет равен $1 \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с} = 1 \text{ эрг} \cdot \text{с} \approx 10^{26} h$. Таким образом, момент импульса по сравнению с h очень велик. Даже если тело — песчинка с периодом вращения, исчисляющимся часами, ее момент импульса, измеренный в единицах h , все же будет выражаться огромным числом.

Рассмотрим, наконец, небольшой, но макроскопический гармонический осциллятор. Пусть его масса равна 1 г, максимальная скорость 1 см/с и максимальная амплитуда $x=1$ см. Тогда его максимальный импульс $p=1 \text{ г} \cdot \text{см}/\text{с}$. Величина $x \cdot p=1 \text{ эрг} \cdot \text{с}$ есть переменная с размерностью действия, и ее значение опять порядка $10^{26} h$.

Таким образом, применение указанного критерия к макроскопическим системам подтверждает нашу уверенность в том, что подобные системы могут быть описаны классически.

22. Теперь постараемся получить более глубокое представление о значении приведенного критерия.

*) *Динамической переменной* называется любая переменная, характеризующая состояние системы, например координата, составляющая импульса или момента импульса, составляющая скорости, полная энергия и т. п.

В классической физике считается, что каждая динамическая переменная системы может быть измерена в принципе сколь угодно точно. Это не означает, что практически имеется подобная возможность. Важно, что *в принципе* возможная точность измерений ничем не ограничена. В классической физике динамическими переменными являются координаты, составляющие импульса, момента импульса и т. д., а также такие переменные, как составляющие векторов электрического и магнитного полей в данной точке пространства в определенный момент времени.

Тщательный анализ реального поведения микроскопических систем показывает, однако, что существует *принципиальный предел* точности, с которой подобные переменные могут быть указаны и измерены. В 1927 г. В. Гейзенберг произвел глубокий анализ причин существования этого предела, который называется *принципом неопределенностей*. Количественное соотношение, выражающее этот принцип для данного частного случая, называется *соотношением неопределенностей*.

Рассмотрим соотношение неопределенностей для пары переменных (q, p) , где q — координата положения частицы, а p — ее импульс. В этом случае

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq h/4\pi. \quad (22a)$$

Здесь Δq и Δp — средние квадратичные погрешности измерения q и p . Написанное неравенство означает, что обе переменные нельзя измерить более точно, чем в том случае, когда произведение их «неопределенностей» имеет порядок постоянной Планка.

Сразу же заметим, что вследствие малости постоянной Планка соотношение неопределенностей не будет играть никакой роли в макрофизике. Другие погрешности для q и p будут в этом случае гораздо больше. Таким образом, соотношение (22a) никак не противоречит нашему *эмпирическому знанию* явлений макромира, хотя, конечно, оно находится в противоречии с классическими теориями, разработанными для макроскопических систем.

23. Принцип неопределенностей иногда «объясняют» следующим образом. Такие динамические переменные, как, например, положение, импульс, момент импульса и т. п., будут определены, если мы укажем экспериментальный способ их измерения. Если мы подвергнем анализу реальные методы измерения в микрофизике, то обнаружим, что любое измерение *возмущает* систему. Это возмущение принципиально неустранимо, так как происходит от взаимодействия системы и измерительной аппаратуры. Если мы попытаемся точно измерить положение частицы, то изменим ее состояние таким образом, что импульс окажется весьма неопределенным. Наоборот, выполняя точные измерения импульса, мы делаем очень неопределенным ее положение. Если же мы попытаемся *одновременно* измерить и положение и импульс частицы, то оба измерения будут влиять друг на друга, и погрешности окончательного результата измерений будут связаны неравенством (22a). Дальней-

шие рассуждения имеют целью объяснить происхождение указанных влияний в некоторых конкретных случаях.

Такое объяснение принципа неопределенностей можно прочесть во многих учебниках. Автор не настаивает на том, что оно совершенно ошибочно, но ему кажется, что оно может привести к большим недоразумениям. Это объяснение обходит существенную особенность, которая заключается в следующем: *соотношение неопределенностей устанавливает пределы, за которыми принципы классической физики становятся неприменимыми*. «Классическая физическая система», описываемая классическими динамическими переменными, которые определенным образом зависят от времени и могут быть известны нам в принципе с произвольной точностью, является плодом абстракции и существует лишь в нашем воображении. В реальном мире таких систем нет. Это подтвердили многочисленные эксперименты. Описывая реальную систему классическими методами, мы допускаем приближение, а соотношение неопределенностей показывает степень его справедливости.

24. Чтобы разъяснить эти идеи, рассмотрим одномерное движение частицы. В классической динамике мгновенное положение частицы может быть задано координатой $q=q(t)$. Если масса частицы равна m и частица движется достаточно медленно, ее импульс $p=p(t)=m dq(t)/dt$. Мы могли бы считать, что принцип неопределенностей выражает неспособность наших измерительных приборов определить $q(0)$ и $p(0)$ с произвольной точностью, но что у нас остается возможность рассуждать о точных значениях этих величин и о последовательном движении частицы от точки к точке. Иными словами, мы могли бы думать, что следует продолжать пользоваться понятием классической траектории, по которой движется каждая частица, но что существует неопределенность в том, по какой именно траектории следует частица, вытекающая из соотношения неопределенностей, примененного к начальным условиям.

Это не так. Опыт показывает, что наши идеи нуждаются в более радикальном изменении. *Необходимо отказаться от самого понятия классической траектории*. Вопрос об одновременных значениях $q(t)$ и $p(t)$ не менее бессмыслен, нежели вопрос о цвете волос короля Соединенных Штатов.

25. Может показаться, что в наших рассуждениях имеется логическое противоречие. Сперва мы установили соотношение неопределенностей, а затем утверждаем, что входящие в него переменные p и q лишены смысла. Если это так, то какой смысл в самом соотношении? Ответ заключается в следующем. При квантовомеханическом описании поведения частицы можно ввести некоторые математические объекты q и p , которые во многих отношениях *соответствуют* классическим переменным — координате и импульсу. Эти объекты, однако, не идентичны классическим переменным. Соотношение (22а) говорит нам, что если мы будем пытаться интерпретировать квантовомеханические объекты q и p как «координату» и «импульс» и рассматривать движение классически, то существует принципиальное ограничение точности, с которой могут быть известны «координата»

и «импульс». Другими словами, соотношение неопределенностей показывает, что, *пытаясь* описать движение частицы с помощью классических переменных q и p , мы имеем дело с принципиальным ограничением точности такого описания.

26. Следует ясно понимать, что соотношение неопределенностей не является выводом из анализа процесса измерения, рассматриваемого в классических понятиях. Это соотношение отражает экспериментально обнаруженные свойства природы. Реальные частицы не ведут себя подобно точечным частицам классической физики или подобно малым бильiardным шарам. У них иные свойства, и именно поэтому некоторые измерения не могут быть выполнены даже мысленно.

В последующих главах мы изучим свойства частиц реального мира и увидим, что соотношения неопределенностей, кажущиеся странными, естественно вписываются в общую схему явлений.

Открытие постоянной Планка

27. Обратимся теперь к истории открытия постоянной Планка. Интересно проследить появление и триумфальный путь этой константы в физике. Нам следует вернуться к началу нашего века и рассмотреть некоторые не решенные в то время проблемы. Вот важнейшие из них:

- 1) проблема излучения черного тела;
- 2) проблема фотоэлектрического эффекта;
- 3) проблема стабильности и размера атомов.

Это далеко не единственные проблемы, занимавшие физиков той эпохи, но в них наиболее отчетливо проявились противоречия классической физики.

С исторической точки зрения наш обзор более чем схематичен. Вопрос о развитии квантовой механики невозможно уложить в несколько страниц. Рассматривая ситуацию начала века из сегодняшнего дня, мы понимаем, что три перечисленные задачи были ключевыми. Однако если просмотреть статьи, опубликованные в 1900 г. в «Annalen der Physik» (один из ведущих журналов того времени), то мы обнаружим, что большую часть физиков привлекали совсем другие задачи. Во все времена способность отличить значительные проблемы от незначительных была редкостью. Тем больше у нас оснований признать замечательную интуицию и силу воображения тех, кто положил начало квантовой физике.

28. Чтобы подчеркнуть ситуацию, покажем, что три перечисленные проблемы являются различными аспектами фундаментальной «тайны потерянной константы». Конечно, трудности, стоявшие перед физиками в 1900 г., не были сформулированы таким образом, но для нас такая точка зрения удобна и поучительна.

Под «потерянной константой» мы подразумеваем, конечно, постоянную Планка h . В чисто классической теории такой константы не существует. Рассмотрим поэтому некоторые основные физиче-