

Волновая механика Эрвина Шредингера

А. ВАСИЛЬЕВ

ИМЯ ВЫДАЮЩЕГОСЯ ФИЗИКА Эрвина Шредингера неразрывно связано со становлением и развитием квантовой теории. Его волновое уравнение занимает центральное место в этой теории и ставит Шредингера в ряд величайших ученых современности.

Поразителен творческий диапазон Шредингера. Он внес заметный или определяющий вклад в квантовую механику и электродинамику, физику элементарных частиц и космических лучей, статистическую механику и термодинамику, общую теорию относительности, космологию и теорию поля. Им выполнены пионерские работы на стыке физики и биологии и написаны труды по философским проблемам естествознания.

Круг интересов Шредингера выходил далеко за пределы физики и естествознания вообще. Он был знатоком античной и восточной философии, великолепно знал мировую литературу, владел многими языками, в том числе древнегреческим и латынью, и предпочитал читать великие произведения мировой литературы в оригинале. Наконец, Шредингер занимался лепкой, писал стихи и даже издал книгу своих стихотворений. Современники поражались его энциклопедичности и универсализму.

Бурные события XX века, и прежде всего мировые войны, заметно повлияли на жизнь Шредингера — ему пришлось много раз переезжать из одной европейской страны в другую, а на родину, в Австрию, он вернулся лишь на склоне лет.

Эрвин Шредингер родился в 1887 году в Вене и там же закончил престижную Академическую гимназию. После блестяще сданных выпускных экзаменов он поступил в Венский университет, выбрав своей специальностью физику и математику.

Будучи учеником выдающегося представителя венской физической школы Фрица Газенорля, Шредингер основательно изучил математические методы физики и уже в студенческие годы сочетал блестящую физическую эрудицию с мастерским владением этими методами. Научную деятельность он начал в Венском университете, занимаясь классической механикой, броуновским движением и теорией ошибок. Вскоре, однако, его внимание привлекла квантовая теория, достигшая к тому времени уже значительных успехов.

В 1920 году Шредингер переехал в Германию, а через короткое время получил предложение из Цюрихского университета возглавить кафедру теоретической физики. В эти годы французский физик Луи де Бройль развивал идеи о переносе корпускулярно-волнового дуализма света, постулированного Эйнштейном для объяснения фотоэффекта, на частицы вещества. Согласно представлениям де Бройля, всякой частице, характеризующейся импульсом и энергией, можно было приписать также некоторую частоту колебаний и длину волны. Шредингер познакомился с этой теорией в 1925 году, и она вдохновила его на разработку волновой механики для описания физических свойств атома. Уже в следующем году он начал публикацию серии работ под общим названием «Квантование как задача о собственных значениях», которые стали со временем классикой науки и поставили на солидную основу казавшуюся до тех пор таинственной волновую механику.

Использовавшиеся в те годы представления квантовой физики оставались во многом несогласованными и противоречивыми. Например, в атомной модели Бора для расчета электронных орбит и процессов излуче-

ния использовались законы классической механики и электродинамики, тогда как для объяснения устойчивости электронных орбит привлекались квантовые условия. Важный шаг в преодолении этих противоречий был сделан в 1925 году Вернером Гейзенбергом, в работах которого были заложены основы созданной им впоследствии (совместно с М. Борном и П. Иорданом) матричной механики.

Гейзенберг исходил из предположения, что в физике микромира следует интересоваться не наблюдаемыми величинами (такими, как электронные орбиты или периоды обращения электронов в атоме), а теми величинами, которые можно измерить (например, частотой излучения и интенсивностью спектральных линий). Целью Гейзенберга было создание строгой квантовой теории, в которую, по аналогии с классической механикой, входили бы лишь соотношения между наблюдаемыми величинами. Введенный им формализм матричной механики уже через короткое время был усовершенствован настолько, что позволял получать точные решения многих физических задач.

Шредингер был осведомлен о новых веяниях в квантовой теории, однако сложные методы матричной механики и недостаток наглядности «отпугивали» его. Работая в Цюрихе, он находился довольно далеко от тогдашних центров атомной физики да и с их лидерами не поддерживал личных контактов. К тому же независимая натура Шредингера не позволяла ему в своих исследованиях примыкать к той или иной доктрине. В результате к созданию волновой механики Шредингер пришел своим собственным путем, рассматривая атом как колебательную систему и отождествляя возможные собствен-

ные колебания этой системы с устойчивыми энергетическими состояниями в атоме. Близкое знакомство с теорией колебаний помогло Шредингеру сформулировать основную физическую идею в рамках задачи о собственных значениях дифференциального уравнения.

Стремясь осмыслить гипотезу де Бройля и построить на ее основе новую атомную теорию, Шредингер опирался на глубокое знание аналитической механики Гамильтона. Еще в середине XIX века этот ирландский математик придал законченный вид теоретической механике и установил формальную связь между классической механикой и геометрической оптикой. Оптико-механическая аналогия позволила ему представить основные закономерности этих, на первый взгляд различных, дисциплин в одном и том же математическом виде. Так, в рамках оптико-механической аналогии закон движения материальной точки с заданной энергией в статическом силовом поле имеет тот же вид, что и закон распространения монохроматического светового пучка в среде с меняющимся показателем преломления. При этом постоянное значение энергии материальной точки соответствует постоянной частоте колебаний световой волны, а скорость точки соответствует групповой скорости распространения света в среде.

Шредингер решил распространить математическую аналогию между оптикой и механикой на волновые свойства света и материи. Преодолев на этом пути многочисленные математические трудности, он получил знаменитое волновое уравнение для атома водорода

$$\Delta\psi + (2m/h^2)(E + e^2/r)\psi = 0,$$

где ψ – волновая функция, m – масса электрона, e – его заряд, r – расстояние между электроном и ядром, E – полная энергия системы, h – постоянная Планка, Δ – математический символ (оператор Лапласа), который в декартовой системе координат имеет вид

$$\Delta = d^2/dx^2 + d^2/dy^2 + d^2/dz^2.$$

Это соотношение, выражающее обобщение гипотезы де Бройля о волновых свойствах вещества, с математической точки зрения представляет собой линейное дифференци-

альное уравнение, решения которого имеют смысл стоячих волн. Теперь стационарные электронные орбиты в атоме Бора могли рассматриваться как собственные колебания – по аналогии с тем, как натянутая струна колеблется лишь с некоторыми дискретными частотами, зависящими от ее длины и граничных условий. С помощью полученного им волнового уравнения Шредингер рассчитал энергетические уровни такого гармонического осциллятора и показал на примере атома водорода, что теоретически рассчитанные энергетические уровни либо совпадают со значениями, полученными в рамках матричной механики Гейзенберга, либо хорошо согласуются с экспериментом. Использование хорошо известных методов математической физики сделало теорию Шредингера более привлекательной для физиков, чем матричная механика Гейзенберга. Более того, в своей третьей статье о квантовании Шредингер показал полную математическую эквивалентность матричной и волновой механики – из собственных волновых функций Шредингера можно было построить матрицы Гейзенберга и наоборот.

Итак, единая квантовая теория была создана, однако дискуссия о ее физическом содержании продолжалась. Главным предметом этой дискуссии стал вопрос о природе волновой функции. По отношению к этой проблеме физики разделились на два лагеря. Сам Шредингер, для которого авторитет классической концепции движения был непререкаем, трактовал волновую функцию самым наглядным образом и говорил в этой связи о колебательном движении в трехмерном пространстве. Квантовый скачок при переходе атома из одного состояния в другое интерпретировался как постепенный переход из состояния, соответствующего собственному колебанию с энергией E_m , в состояние с энергией E_n , при этом излишек энергии излучался в виде электромагнитной волны. Электрон представлялся электрически заряженным облаком, обволакивающим атом, и преобразовывался в пространственно распределенную электромагнитную волну, движущуюся непрерывно, без всякого квантового скачка. Квантовая механика, таким образом, естественно примыкала к классической, что

особенно импонировало как самому Шредингеру, так и воспитанным в традициях классической физики де Бройлю, Эйнштейну, фон Лауэ, Планку.

Другой точки зрения придерживались Паули, Гейзенберг и Бор. Напряженная работа по прояснению поставленных проблем показала, что полуклассическая интерпретация волновой механики неправомерна и что построить теорию на базе только волновых представлений, отказавшись от концепции корпускулярно-волнового дуализма, невозможно.

Выход из затруднения подсказали исследования процессов атомных столкновений, проведенные в 1926 году Максом Борном. Анализ рассеяния электронов и α -частиц на ядрах дал ключ к пониманию смысла волновой функции Шредингера: квадрат ее амплитуды соответствовал вероятности, с которой частица могла быть обнаружена в данной точке пространства. Это означало, что волновая функция описывает отдельные события (например, акт излучения кванта света) лишь с точки зрения вероятности их осуществления. Такая интерпретация поставила волновую механику на прочную физическую основу и вскоре получила относительно замкнутый и непротиворечивый вид. В настоящее время статистическое истолкование квантовой теории является общепринятым.

Хотя надежды Шредингера на создание своего рода классической теории поля для атомных явлений не оправдались, его волновая механика стала важным шагом в разработке математических методов квантовой механики и в развитии теоретико-познавательного содержания квантовой физики. В последующие годы Шредингер много занимался детальной проработкой разнообразных аспектов волновой механики и ее практическими приложениями. Особое место заняли здесь его работы по теории возмущений.

Как создатель волновой механики Эрвин Шредингер выдвинулся в первые ряды физиков своего времени. В 1933 году ему вместе с Полем Дираком была присуждена Нобелевская премия по физике «за открытие новых форм атомной теории».