

Требования фундаментальной физической теории *)

Выступление на встрече нобелевских лауреатов в Линдау 1 июля 1982 года. Записал и подготовил к печати А. Л. Шавлов

Я присутствовал на всех встречах по физике в Линдау с самого начала. Мне очень приятно побывать здесь еще раз и использовать возможность поговорить о фундаментальных проблемах физики. Разрешите мне воспользоваться доской? Она понадобится ненадолго. Я просто хочу написать одно уравнение, потому что вокруг него будет сосредоточено все мое выступление. Это уравнение знакомо каждому студенту, изучающему физику:

$$i\hbar du/dt = uH - Hu.$$

В 1925 году Гейзенберг ввел свою новую квантовую механику. В ней динамические переменные присутствуют как некоммутирующие величины. Иными словами, если u и v — две динамические переменные, то произведение u на v — это не то же самое, что произведение v на u . Для физиков эта идея была поразительной, и им было очень трудно к ней привыкнуть. Как я слышал, сам Гейзенберг, осознав, что произведение u на v не равно произведению v на u , подумал, что его теория должна быть неверной. Чтобы продолжить работу, ему понадобилось решительное ободрение со стороны его профессора, Макса Борна. К этой идее трудно привыкнуть, потому что если $u=3$, $v=4$, то, конечно, $3 \cdot 4 = 4 \cdot 3$. Это значит, что u не может быть равно 3, в то время как v равно 4. Необходима специальная интерпретация квантовой механики, и эта интерпретация оказалась статистической по своей природе. С ней надо работать, пользуясь вероятностями.

Я не собираюсь обсуждать здесь вопрос об интерпретации квантовой механики, о ней не раз говорилось. Я хочу обсудить более фундаментальные вещи. Для любой динамической переменной, например u , теория Гейзенберга дает уравнение движения, написанное мною: du/dt , скорость изменения u со временем, равна разности произведений u на H и H на u . Здесь H — некая динамическая переменная, характеризующая динамическую систему, с которой мы работаем, и называемая гамильтонианом. Для рассмотрения данной динамической системы нужно выбрать подходящий гамильтониан.

*) The Requirements of Fundamental Physical Theory // European Journal of Physics.— 1984.— V. 5.— P. 65—67.

Для другой динамической системы надо взять другой гамильтониан, так что различные динамические системы отвечают различным выборам H .

С развитием теории Гейзенберга выяснилось, что существует тесная аналогия между новой механикой Гейзенберга и старой механикой Ньютона. Этот вопрос рассматривали позже несколько людей. Указанная аналогия позволяла по заданной классической системе построить соответствующую квантовую систему, и оказалось, что в силу этой связи квантовая теория приводит к результатам, весьма близким к результатам старой классической теории, если речь идет о телах с большими массами.

Все это казалось вполне удовлетворительным и привело к тому, что вера в теорию Гейзенберга очень укрепилась. Напомним, что теория возникла в 1925 году и ее развитие происходило в следующие год или два. До этого мы могли работать лишь с боровскими орбитами. Боровские орбиты вполне годились для простых задач, в которых присутствовал всего один электрон, однако теория Бора не давала удовлетворительного результата уже для двух взаимодействующих электронов. Эта старая теория, основанная на боровских орбитах, уступила место квантовой механике Гейзенберга, которая носила вполне общий характер, и все были счастливы, что ее можно использовать вместо примитивной теории боровских орбит.

Как развивалась квантовая механика? Тесная связь между новой теорией и старой классической теорией производила сильное впечатление. Задача состояла в том, чтобы найти правильный гамильтониан для любой заданной динамической системы. Для самой общей системы, содержащей взаимодействующие друг с другом поля и частицы, можно начать с применения методов классической теории, и это даст некоторый гамильтониан, вид которого можно найти. Однако если подставить этот гамильтониан в фундаментальное уравнение движения теории Гейзенберга, результат будет заведомо неверен. Он окажется не только неправильным, но и вообще бессмысленным, так как будет содержать бесконечности. Эта теория в действительности совсем неверна, тем не менее физики предпочитают пользоваться гамильтонианом, который подсказан классической теорией. Но как же они обходятся этими неправильными уравнениями? Они отвечают так: при попытке решить уравнения возникают бесконечности, а их там быть не должно. Так давайте устраним их искусственно. Но это означает отход от гейзенберговских уравнений движения.

Люди порой не сознают, что они на самом деле отходят от первоначальной теории Гейзенберга и что они сами себя ограничивают, придерживаясь исходного гамильтониана и устраняя бесконечности искусственным образом. В действительности, этому есть некоторое оправдание, так как для устранения бесконечностей сформулированы определенные правила. Эти правила называются перенормировкой, и при их использовании иногда оказывается, что можно получить очень хорошее согласие с экспериментом. В частности, если мы

рассматриваем заряженные частицы, взаимодействующие с электромагнитным полем, и используем процедуру перенормировки, то согласие получается исключительно хорошим, даже поразительно хорошим, и большинство физиков считает, что это доказывает правильность принятого подхода. Я полагаю этот довод неубедительным. Тот факт, что результаты оказались в согласии с экспериментом, еще не доказывает, что теория верна. Между прочим, теория Бора тоже давала правильные результаты в простых случаях; из нее следовали правильные ответы, но исходила она из неверных представлений. С этой точки зрения, перенормировочный вариант квантовой теории, с которым работают физики в настоящее время, не может быть оправдан своим согласием с экспериментом при некоторых условиях.

Несмотря на это, физики вложили немало труда в развитие теории. Фактически, почти вся физика элементарных частиц за последние четыре десятилетия развивалась в этом направлении. Использовался гамильтониан, который привел бы к неверным результатам, если бы его использовали непосредственно, и к нему дополнительно формулировались правила вычитания бесконечностей. Мне кажется, что в такой ситуации у нас нет вообще истинной математической теории, а есть только правила для работы. Так что квантовая механика, которую используют в настоящее время большинство физиков, есть не более чем набор правил, а не полная динамическая теория. Тем не менее она разработана весьма подробно.

Развитию упомянутого набора правил посвящено очень много статей, люди научились делать подходящие предположения и часто добиваться достаточно хорошего согласия с данными наблюдений. Но ничего нельзя считать приемлемым; именно на это я хочу обратить внимание. Многие из новейших квантовых теорий поля принять невозможно, хотя немало людей работает над ними и нередко их работа выполнена весьма тщательно.

Я хотел бы отметить, что мое стремление придерживаться уравнения Гейзенберга ранее привело к большому успеху. Рассматривая просто один электрон, взаимодействующий с электромагнитным полем, мы понимаем, что уравнение де Бройля, определяющее движение волн, связанных с частицей, должно войти в теорию; эта идея господствовала среди физиков, работавших над данной проблемой в 1926 и 1927 годах. Но использование уравнения де Бройля в рамках теории Гейзенберга приводило к трудностям, которым люди старались не придавать слишком большого значения. Я же настаивал на том, что необходимо придерживаться теории Гейзенберга, и это убеждение позволило мне придумать гамильтониан нового типа, который вовсе не следовал из классической механики. Я отошел от принципа, согласно которому гамильтониан должен быть подсказан классической теорией, и получил новый гамильтониан, зависящий от спиновой переменной. Электрон, движение которого описывается таким гамильтонианом, должен иметь спин, причем свойства этого спина оказались соответствующими наблюдаемым свойствам электрона. Это был большой успех, и мы увидели,

как, отказавшись от идей, почерпнутых из классической механики, можно добиться продвижения в новом направлении.

Что же надо делать в теперешней ситуации? Мне кажется, что надо придерживаться подхода, основанного на уравнении Гейзенберга. Именно оно представляет собой фундамент квантовой теории. Надо исходить из этого принципа во всем, что мы делаем, и если уравнение приводит к неправильным результатам, то это значит, что мы взяли неверный гамильтониан. Именно это соображение мне хотелось бы подчеркнуть. Не следует менять основание квантовой механики Гейзенберга. Оно очень прочно и очень красиво.

Можно ли найти более подходящий гамильтониан? Перед нами огромные возможности, потому что теория Гейзенберга представляет собой очень мощный инструмент, гораздо более мощный, чем классическая механика. Ее сила в том, что входящие в нее динамические переменные могут иметь очень общую природу. Обычно эти динамические переменные считаются функциями динамических координат и их производных. Первоначально Гейзенберг сформулировал свои уравнения в терминах динамических переменных, имеющих вид матриц. Подход Гейзенберга можно существенно обобщить, вводя более общие типы динамических переменных. Это могут быть любые алгебраические величины, причем, вообще говоря, коммутативности умножения не требуется: произведение u на v не равно произведению v на u , однако умножение должно быть ассоциативно. При этом возникают большие возможности. Динамические переменные могут быть не связаны с переменными классической механики. Возможно, что динамические переменные являются элементами некоторой группы. Современная физика в существенной степени связана с введением таких динамических переменных в квантовую теорию. Какую же группу надо взять? Выбор весьма велик, и физики просто изучают различные группы, чтобы выяснить, какие из них могут быть полезными. Не исключено, что динамические переменные могут иметь еще более общую природу и оказаться чем-то таким, о чем еще не думали физики.

Я полагаю, что физикам следует двигаться именно в этом направлении, а не работать с искаженным уравнением Гейзенберга. Надо направить усилия на поиски правильного гамильтониана, используя богатые возможности, возникающие, когда в нашем распоряжении есть некоммутирующие величины общего вида, причем вполне возможно, что надо вводить величины, которые не имеют аналогов в классической теории. Современная тенденция придерживаться идей, почерпнутых из классической механики и дополненных некоторыми группами, представляется очень ограниченной. Хотя почти все физики в мире исходят из этих принципов, я уверен, что такой подход нельзя считать достаточно общим. Надо поискать гамильтониан более общего вида.

Несколько лет назад я придумал новый гамильтониан, который согласуется с уравнением Гейзенберга, но обладает тем свойством, что все его решения соответствуют положительным энергиям, в то

время как в прежней теории были решения как с положительными, так и с отрицательными энергиями. В этой новой теории возникли весьма интересные уравнения, но пока она не привела ни к чему такому, что представляло бы практический интерес. И все же мне хотелось бы упомянуть об этом, как о примере того, на каком пути можно попытаться добиться успеха. Я потратил много лет в поисках подходящего гамильтониана для этой теории и все еще его не нашел. Пока смогу, я буду продолжать эту работу, и надеюсь, что другие тоже пойдут по этому пути. Когда-нибудь правильный гамильтониан будет найден, и тогда обнаружатся какие-то новые степени свободы, что-то такое, чего нельзя почерпнуть из классических идей и что играет важную роль в основаниях квантовой механики.