**Буриданов осел и шредингеровская кошка**

М. И. Кацнельсон

У знаменитого аргенитинского писателя Хорхе Борхеса есть произведение (жанр определить не берусь) - "Бестиарий", представляющее собой сборник заметок о различных вымышленных существах. Там, между прочим, рассказывается (школьники и преподаватели, внимание!) о некоем китайском мудреце, который, упорно трудясь, за три года изучил искусство убивать драконов при помощи колдовства. Однако это искусство ему так и не пригодилось, так как за всю последующую жизнь ему так почему-то и не встретился ни один дракон... Льщу себя надеждой, что знакомство с двумя упомянутыми в заглавии животными окажется, возможно, более поучительным и полезным.

Французский средневековый мыслитель (слово "схоласт" в новейшее время приобрело некий ненужный оценочный смысл) Буридан придумал замечательный мысленный эксперимент. Представим себе осла, стоящего в точке, равноудаленной от двух совершенно одинаковых охапок сена. Так как нет никаких причин, почему осел должен предпочесть правую (или левую) охапку, мы приходим к выводу, что осел не сможет сделать выбор и умрет от голода! (Знающие люди говорят, что исходно речь шла о собаке и, соответственно, о не столь вегетарианской еде, как сено, но в фольклор история вошла именно в таком варианте). Интуитивно ясно, что здесь что-то не так, и мы имеем дело с парадоксом. Эта забавная ситуация вобрала в себя массу возможностей порассуждать о спонтанно нарушенной симметрии, устойчивом и неустойчивом равновесии, флуктуациях, бифуркациях и прочих мудреных вещах. Пожалуй, самое важное, что она может заставить задуматься о детерминизме, предсказуемости поведения сложных систем (в данном случае ослов) и свободе воли (в данном случае опять же ослов). Я твердо уверен, как и многие другие люди, что все эти проблемы не могут быть решены в рамках одного лишь научного подхода, однако при размышлении о подобных философских проблемах небесполезно все же знать некоторые имеющие отношение к делу выводы и результаты современной физики. Итак, забудем временно об ограниченности чисто естественнонаучного взгляда на мир, и попробуем разобраться в ситуации, рассматривая осла, сено и прочие участвующие в эксперименте сущности как скопища ядер и электронов, подчиняющихся физическим законам. В состоянии ли мы на основании этих законов однозначно предсказать, какую охапку сена выберет осел?

С точки зрения ньютоновской механики дело обстоит следующим образом. В некий момент времени мы должны знать скорости и координаты всех частиц, из которых состоит наша система, что в принципе может быть достигнуто со сколь угодно высокой точностью. Мы должны также знать выражения для сил, действующих между двумя любыми частицами системы. Это тоже принципиально возможно - все такие силы в конечном счете сводятся к электромагнитным и гравитационным, а их законы мы знаем. В соответствии со вторым законом Ньютона, мы можем найти ускорения всех частиц в этот момент времени. Тогда, зная скорости, мы можем найти новые значения координат всех частиц через некоторый малый промежуток времени, а зная ускорения - скорости через этот промежуток. Повторить процедуру нужное число раз. Таким путем мы можем - в принципе! - знать состояние системы со сколь угодно высокой точностью в любой будущий момент времени. Более того, так как законы механики, электромагнетизма и гравитации допускают формально обращение знака времени, мы можем столь же детально восстановить и прошлое системы. Конечно, все это делается не совсем так, и у людей, знакомых с вычислительной математикой, от такого описания процедуры решения дифференциальных уравнений вполне может случиться истерический припадок, но принципиально здесь все верно! Вроде бы нет причин, почему при абсолютно точном знании координат и скоростей всех частиц системы в некоторый момент времени нам не восстановить со сколь угодно высокой точностью все ее прошлое и будущее. Великий французский математик, физик и астроном Пьер Лаплас в конце 18 века на основании приблизительно таких же рассуждений пришел к устрашающему выводу, что некое гипотетическое существо, знающее скорости и координаты всех частиц во Вселенной и умеющее делать без ошибок сколь угодно длинные выкладки, восстановит прошлое и правильно предскажет будущее всей Вселенной! Конечно, свобода воли при этом оказывается всего-навсего иллюзией.

Правильно ли это с чисто естественнонаучной точки зрения? На первый взгляд, ошибок в наших рассуждениях нет. В то же время, кое-что настораживает сразу. Ну, например, походя получившийся вывод об отсутствии принципиальных различий между описанием будущего и прошлого системы противоречит не только повседневному жизненному опыту, но и одному из самых надежно установленных законов природы - второму началу термодинамики. Так как я пишу для школьников, желающих узнать что-то сверх школьной программы, нет нужды детально обсуждать здесь проблемы, возникшие у Людвига Больцмана и других умных людей при попытке примирить второе начало термодинамики с законами механики. Все же стоит, пожалуй, нарушая хронологическую последовательность, упомянуть о некоторых не столь известных достижениях - уже во второй половине 20 века - в нашем понимании проблем предсказуемости и обратимости в рамках классической механики, тем более, что они имеют довольно непосредственное отношение к "проблеме Буриданова осла". Трудами многих ученых, в том числе замечательных российских математиков А. Колмогорова, Я. Синая, Д. Аносова, В. Арнольда и других, удалось установить следующее (подробнее об этих вещах можно прочитать в доступных подготовленным школьникам книгах: Г.А. Гальперин, А.Н. Земляков, Математические биллиарды, Библиотечка "Квант", вып. 77, 1990, и И. Пригожин, От существующего к возникающему, М., Наука, 1985).

Великий немецкий философ Гегель сказал: "Ответ на вопросы, которые оставляет без ответа философия, заключается в том, что они должны быть иначе поставлены". Так вот, если мы хотим в рамках ньютоновской механики понять природу различия между прошлым и будущим, мы должны поставить вопрос иначе - не об индивидуальной траектории частиц системы, а о поведении пучка близких траекторий. Предположим, что координаты и скорости все частиц в некоторый момент времени известны со сколь угодно малой, но конечной погрешностью. Если описывать, как это принято в современной механике, поведение системы как движение точки в многомерном фазовом пространстве (в котором по осям отложены компоненты координат и скоростей всех частиц - тем самым, по 6 осей на каждую частицу), то эта точка начинает свое движение в некотором "гиперпараллелепипеде", стороны которого - это величины погрешностей. Будем следить за эволюцией всей этой области. Если все силы в системе консервативны, то есть выполняется закон сохранения энергии, то, согласно одной из основных теорем классической механики - теореме Лиувилля - объем области в процессе движения остается постоянным. В то же время, диаметр области, то есть расстояние между наиболее удаленными ее точками, может, оказывается, расти, причем очень быстро (по экспоненциальному закону, то есть в геометрической прогрессии). Исходная "клякса" в фазовом пространстве, грубо говоря, расплывается, утоньшаясь. Показатель, определяющий скорость этого расплывания, обычно называют колмогоровской энтропией. Такое поведение характерно не для всех систем (скажем, оно не проявляется для столь излюбленного в школьной физике гармонического осциллятора, или при кеплеровском движении по орбите под действием гравитации). В то же время, оно не является и экзотикой, например, имеет место уже для одной частицы, движущейся по части плоскости, ограниченной кривой с участками, "выпуклыми внутрь", и отражающейся от стенок по законам упругого удара - "биллиард Синая". Для систем, состоящих из большого числа частиц, такое поведение является "типичным", то есть "гораздо больше" систем ведет себя как "биллиард Синая" чем как гармонический осциллятор (специально не уточняю смысл слов "типичный" и "гораздо больше" для возбуждения здорового любопытства читателей). Буриданов осел + охапки сена, а тем более вся Вселенная, явно относятся к системам с конечной колмогоровской энтропией. Это означает, что любая сколь угодно малая погрешность в задании начальных данных приводит к сколь угодно большой погрешности в результате, или, иными словами, две сколь угодно близкие траектории системы со временем разойдутся сколь угодно далеко. Лапласовскому всезнающему существу не позавидуешь: хранить данные с бесконечным числом значащих цифр может позволить себе только тот, чей объем памяти - мозга или компьютера - бесконечен, а любое округление приведет к полной неопределенности предсказания даже для относительно небольших промежутков времени! Между прочим, именно поэтому долгосрочный прогноз погоды является лженаучной задачей - куда уж тут посягать на свободу воли даже отдельно взятого осла... Все эти соображения имеют, между прочим, прямое отношение и к проблеме необратимости времени и обоснования второго начала термдинамики, и слово "энтропия" появилось здесь не случайно, но не будем отвлекаться (см. рекомендованную выше книжку Пригожина).

Еще более остро проблема детерминизма и предсказуемости стоит в новой, квантовой, физике, созданной в первой трети 20 века целой плеядой гениев, среди которых Макс Планк, Альберт Эйнштейн, Нильс Бор, Вернер Гейзенберг, Эрвин Шредингер, Поль Дирак, Вольфганг Паули, Макс Борн... Вот об этих вещах я и хочу сейчас рассказать - опять же стараясь не пересказывать то, что должно быть известно из школьной программы.

По английской пословице, "И кошка может смотреть на короля". Каждый из нас, простых смертных, может иметь собственное мнение о творчестве классиков нашей науки. Я думаю, величайшее достижение Эйнштейна - это не широко известная теория относительности, а открытие корпускулярно- волнового дуализма. Грубо говоря, он первый показал, что в таких устройствах как дифракционная решетка свет проявляет свою волновую природу, а в таких, как фотоэлемент - корпускулярную. Конечно, это значит, что "на самом деле" свет не является ни волной, ни потоком частиц. В известной притче о слепцах, которые ощупывали слона с разных сторон и делали утверждения типа "Слон похож на змею" , "Слон похож на колонну", "Слон похож на веревку" (кому-то видимо подвернулся хвост) важно то, что слон - это не змея, не колонна и не веревка, а нечто отличное от них всех. Впоследствии выяснилось, что "корпускулярно-волновой дуализм" присущ и электронам, и нейтронам, и, видимо, всем микрообъектам. Электрон - это частица, так как никто, нигде, никогда не регистрировал 0,98 электрона, а всегда - или целый электрон с присущим ему зарядом, массой и другими характеристиками, или ничего. И электрон - это волна, так как при движении электронов в определенных условиях (скажем, при отражении от поверхности кристалла) наблюдаются типично волновые явления интерференции и дифракции. Значит, "на самом деле" это нечто третье. После ожесточенных споров в физическом сообществе победил приблизительно такой способ интерпретации всех этих чудес. Электрон - это частица. Но: в отличие от классической частицы в смысле Ньютона, он не движется по одной определенной траектории, он движется по всем траекториям сразу. Каждой такой траектории соответствует определенная "амплитуда вероятности" - некое комплексное число. Если просуммировать все такие числа для всех траекторий (ау, юные знатоки матанализа! Понимаете, что значит суммировать по траекториям?! То-то! Интересная штука теоретическая физика, правда?)...Так вот, если просуммировать по траекториям все амплитуды вероятности и посчитать квадрат модуля того, что получилось, мы найдем вероятность движения электрона из начальной точки в конечную за данное время. Что это значит? Допустим, электрон движется сквозь дырки в экране. При этом вероятность прохождения электрона через дырку А, рассчитанная таким способом, составила 0,05, через дырку Б - 0,10 и т.д. Тогда, если везде расставить счетчики, каждый из них будет регистрировать либо целый электрон, либо ничего, но при проведении большой серии однотипных опытов счетчик, поставленный у дырки А, сработает в 5 случаев, у дырки Б - в 10, и т.д. Сверх этого теория нам не может дать ничего, все, что мы можем найти - это вероятности различных процессов. Аналогично обстоит дело и в других процессах в микромире. Скажем, если период полураспада некоего радиоактивного элемента 1 сутки, это значит, что в образце, содержащем большое число ядер, приблизительно половина ядер распадется за сутки. Когда распадется данное конкретное ядро - мы не можем сказать принципиально.

Разумеется, в такой ситуации от лапласовского детерминизма не остается вообще ничего. Эта точка зрения (подтвержденная всеми до сих пор выполненными экспериментами, включая очень изощренные) означала такой сильный разрыв со всеми предшествующими традициями и господствующим стилем мышления, что многие великие физики, в том числе, сам Эйнштейн, а также Шредингер, написавший основной закон движения новой механики - уравнение Шредингера для "волновой функции" (отождествляемой с амплитудой вероятности нахождения электрона в данной точке) отказались принять ее как "окончательное решение вопроса". Их критика была очень конструктивной, а мысленные эксперименты, предлагаемые ими для опровержения новых взглядов, чрезвычайно способствовали прояснению ситуации.

Повседневная жизнь убеждает нас в том, что многие события происходят С достоверностью. Футбольный мяч, или артиллерийский снаряд, или искусственный спутник Земли движется не по всем траекториям сразу, а по вполне определенной траектории, которую можно рассчитать на основе законов Ньютона. На первый взгляд, это не противоречит новой физике. Дело в том, что "длина волны", соответствующая амплитуде вероятности движения частицы, обратно пропорциональна ее массе. Для макрообъектов это величина настолько малая, что волновые свойства просто ненаблюдаемы - длинные радиоволны огибают холм за счет явления дифракции, а УКВ отражаются от него как поток частиц. Классическая физика - это просто предельный случай квантовой для объектов большой массы, точно также как механика Ньютона - это предельный случай теории относительности для скоростей, много меньших скорости света.

Так вот, Шредингер в 1935 году предложил мысленный эксперимент, призванный показать, что ситуация намного хуже: новая физика в действительности ставит под сомнение детерминизм даже для макрообъектов! (В конце концов не забудем - интересует-то нас осел, а не электрон...). Итак, ситуация: в герметически закрытый ящик поместили кошку (со всеми системами жизнеобеспечения, запасом пищи и т.д.). В том же ящике находится жуткое устройство: ампула с синильной кислотой и молоточек, способный ее разбить под действием электрического сигнала. Сигнал возникает при срабатывании счетчика Гейгера на один радиоактивный распад (технически это возможно), и тут же поблизости есть ядро радиоактивного изотопа. Согласно квантовой механике, никто не может сказать, когда именно распадется ядро. Оно находится в квантовом состоянии, которое, как говорят, является суперпозицией (наложением) состояний распавшегося и нераспавшегося ядра. Тем самым, никто не может сказать (пока не вскроет ящик), жива кошка или нет. По всем законам квантовой механики, она находится в состоянии - суперпозиции состояний живой и мертвой кошки. Ситуация абсолютно такая же, как в опыте с прохождением электрона через две щели. Вскрытие ящика аналогично срабатыванию счетчика либо у щели А, либо у щели Б. Значит, если верна стандартная интерпретация квантовой механики, бегло изложенная выше, кошка находится в состояниях живой и мертвой одновременно. Н-да... Какая-то чепуха получилась...

В действительности дело обстоит еще серьезнее. Как разьяснил Нильс Бор в своем принципе дополнительности, само существование квантовой механики возможно лишь в меру существования классических объектов. В чем задача квантовой механики? Описывать движение микрообъектов. Но в каких терминах описывать? Амплитуда вероятности - это все очень хорошо, но амплитуда вероятности чего? Ну, скажем, амплитуда вероятности иметь определенное значение координаты в данный момент времени. Но у электрона нет координаты! Как можно говорить о координате того, что по своей природе способно двигаться сразу по всем траекториям? Так вот, чтобы вообще понимать, о чем мы говорим, мы должны постулировать существование классических объектов - измерительных приборов, которые в определенных условиях с достоверностью измеряют координату, импульс и другие классические характеристики. Скажем, при прохождении электронов через экран с дырками счетчики, установленные у каждой дырки, в совокупности представляют собой прибор, измеряющий координату электрона вдоль экрана. Если считать эти счетчики тоже квантовыми объектами, которые то ли сработают, то ли нет в соответствии с вероятностными законами - все окончательно запутывается, и утверждениям квантовой механики вообще невозможно придать никакого разумного смысла. По Бору, именно в этом и состоит природа корпускулярно- волнового дуализма: мы можем в данном конкретном эксперименте, выбирая подходящие приборы, измерять либо корпускулярные свойства объекта (скажем, координату), либо волновые (скажем, длину волны), но никогда не можем измерить и те, и другие свойства в одном эксперименте. Таким образом, корпускулярные и волновые свойства являются дополнительными.

В то же время, мысленный эксперимент Шредингера показывает, что большие размеры и масса прибора еще не гарантируют "классичности". Даже макрообъект может быть поставлен в такие условия, которые вроде бы проявляют его квантовую, вероятностную природу. Похоже, вместе с водой мы выплеснули и ребенка, перейдя из царства жуткого лапласовского детерминизма в царство полной анархии,

|  |
| --- |
| Где все зазря, и все не то, и все непрочно,  Который час - и то никто не знает точно.... |
| А. Галич. |

Вот мы и пришли к главному вопросу: почему в квантовом мире существуют классические объекты? Что обеспечивает достоверность некоторых (в действительности очень многих!) утверждений об окружающем нас мире? Ладно, пусть мы бессильны определить, какую именно охапку сена выберет Буриданов осел, но трудно представить его находящимся в суперпозиции состояний "жующий правую охапку" и "жующий левую охапку" (кстати, расстояние между ними может быть сколь угодно большим!).

Между прочим, замечание о том, становится ли человечество умнее (не образованнее, а именно умнее). Все эти рассуждения Бора о необходимости описывать квантовые объекты в классических терминах, то есть в терминах мира вокруг нас, с большим трудом воспринимались лучшими умами нашего, предположительно самого умного, времени. А вот что писал Св. Ефрем Сирин в 4 веке:

"Кто говорит, тот кроме имен, взятых с предметов видимых, ничем иным не может слушающим изобразить невидимого" .

Эта штука посильнее, чем "Электрон так же неисчерпаем, как и атом"!

Понятно теперь, почему мы должны описывать электрон в классических терминах волна - частица, хотя он не является ни тем, ни другим?

Вернемся, однако, к нашим зверушкам.

В действительности наиболее радикальным разрывом с прежними представлениями в квантовой механике является не само по себе использование вероятностей. Мы видели, что и в классической механике наши возможности точного решения задачи во многих случаях ограничены самой природой задачи. При этом использование вероятностного языка не только возможно, но и неизбежно. Однако, в классическом случае всегда складываются вероятности независимых событий. В квантовом же случае складываются амплитуды. Именно это и приводит к появлению интерференционных, то есть волновых, явлений (подумайте, почему!). Нет ничего особенно интересного в утверждении, что в наглухо закрытом ящике лежит либо живая, либо мертвая кошка - как нет ничего интересного в утверждении, что монетка упадет с равными вероятностями либо орлом, либо решкой. Все парадоксы квантовой механики связаны с тем, что эти состояния интерферируют. Так вот. Если мы рассматриваем строго изолированную от внешнего мира систему, то никакой ошибки в рассуждении Шредингера нет. Как и в проблеме предсказуемости в классической механике, мы должны несколько изменить постановку задачи и рассмотреть открытые системы. Такая задача была впервые поставлена в четкой математической форме в 1963 году великим американским физиком Ричардом Фейнманом - тем самым, который придал квантовой физике ее современную форму, научив нас суммировать по траекториям и придумав свои знаменитые диаграммы. В результате ее тщательного исследования (особо важную роль здесь сыграли работы американского физика А. Леггетта) оказалось, что взаимодействие с окружением разрушает квантовую интерференцию, превращая тем самым квантовую систему в классическую, причем тем быстрее, чем больше масса системы. Так что классические системы, в том числе измерительные приборы, существуют потому, что они взаимодействуют с окружающим миром! Кстати, совсем изолировать какую-то систему в нашей Вселенной невозможно, даже в межгалактическом пространстве - никуда не деться от заполняющего весь мир так называемого реликтового излучения... Но это уже, как говорится, совсем другая история.

Для того, чтобы изучить взаимодействие макрообъектов с окружением и связанные с этим эффекты разрушения квантовой интерференции, к счастью, нет нужды так живодерствовать как в оригинальной постановке проблемы. Все эти явления сейчас изучаются на так называемых сверхпроводящих квантовых устройствах (СКВИДах), малых магнитных частицах или магнитных молекулах, и других объектах. Но обсуждение всех этих вопросов завело бы нас сейчас слишком далеко. Мне хотелось бы отметить другое. Конечно, физика не может решать "вечные" философские проблемы - о предопределении, то есть судьбе, свободе воли, причинности, случайности и так далее, и, думаю, ни в коем случае и не должна пытаться это делать - добром это не кончится... Но она явно "имеет что сказать" по всем этим вопросам такого, что неплохо бы знать каждому образованному человеку - чтобы получше представлять себе, как устроен мир, в котором он живет. Здесь я хотел дать читателю представление о сложности и "многогранности" одной из принципиальных проблем современной науки - проблемы предсказуемости поведения различных систем и объектов. Оказывается, что даже в классической механике Ньютона возможность предсказать движение системы для достаточно больших промежутков времени, как правило, ограничена. В современной квантовой физике возможность однозначных предсказаний ограничена еще сильнее, и сам математический аппарат сориентирован на вычисление вероятностей различных процессов. При этом проблема предсказуемости оказывается очень тесно связанной с открытостью этих систем - их (сколь угодно малым, но конечным) взаимодействием с остальной Вселенной. При этом, парадоксальным образом, в квантовой механике эта "открытость" не уничтожает, а, напротив, создает в некоторых случаях возможность делать определенные предсказания, разрушая квантовую "интерференцию состояний". Все эти вопросы можно лишь "обозначить" в короткой статье, но я надеюсь, любопытство части читателей будет разбужено достаточно, чтобы они попытались читать более серьезную литературу по этим вопросам.