

Бас ван Фраассен

Квантовая механика: точка зрения эмпирика.

Эмпирические основания квантовой теории.

Угроза индетерминизма.

Еще в начале нынешнего столетия были изучены радиоактивный распад и фотоэлектрический эффект. Были предложены модели, согласно которым энергия передается квантами. Посмотрим несли ли они угрозу детерминизму. Насколько консервативной может оставаться теория, сталкивающаяся с такой угрозой?

Самый знакомый закон радиоактивного распада следующий: период полураспада радия равен 1600 годам. Грубо говоря кусок радия, оставленный где-то на 1600 лет, частично превратится в радон, причем останется ровно половина от исходного количества радия. Теперь легко видеть, что этот так сказать закон должен быть строго говоря ложным. Что если число атомов радия нечетное?

Тот же вопрос возникает и в отношении хорошо сформулированного феноменологического закона радиоактивного распада. Пусть количество материи в момент времени t будет $N(t)$. $N(0)$ – начальное количество. Тогда

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

Где λ – константа распада, характеризующая вещество. Однако множитель $e^{-\lambda t}$ изменяется от 0 до 1, пробегая (в том числе) множество иррациональных чисел. Будь начальное количество четным, будь нечетным числом атомов, иррациональный множитель сделает $N(t)$ иррациональным числом, которое не может выражать количество атомов. Это особенно странно, когда берется один атом радия.

Ответ известен – и не может быть иным -- $e^{-\lambda t}$ - представляет собой вероятность того, что этот единственный атом останется стабильным в течение интервала t . Формула (1) выражает математическое ожидание количества оставшегося радия. Теперь детерминизм под угрозой, так как этот закон принял статистическую форму. Однако угроза выглядит в принципе преодолимой.

Может быть этот единичный атом имеет скрытые особенности, которые точно определяют его время распада? Только наше неведение заставляет вводить здесь вероятность, а именно вероятность того, что атом остается

стабильным, даже если скрытый параметр принял одно из своего множества значений.

Пока нет ничего невозможного в такой спекуляции. Рассмотрим поляризованный свет и фильтры (такие как линзы в солнечных очках). Вертикально поляризованная световая волна встречает такой фильтр на своем пути. Фильтр может быть ориентирован в различных направлениях. Если он установлен вертикально, то он пропускает эту световую волну. Если горизонтально, то нет. Если же ориентация промежуточная и составляет угол θ , то прохождение пропорционально $\cos^2 \theta$. Новые модели трактуют свет, состоящим из фотонов, и мы снова приходим к проблеме иррациональных чисел. Функция $\cos^2 \theta$ дает нам дроби, в том числе иррациональные. В результате мы не можем говорить о числе фотонов, проходящих через фильтр, мы можем говорить, что вероятность прохождения единичного фотона равна $\cos^2 \theta$.

Как здесь выглядит идея скрытого детерминизма? Каждый фотон обладает скрытым параметром, определяющим для каждой ориентации фильтра, пройдет ли фотон через него. Но тогда фильтр не просто пропускает фотон. Ибо если мы ставим вертикальный фильтр после фильтра, ориентированного под углом θ , мы получаем луч, снова уменьшенный в пропорции $\cos^2 \theta$. Следовательно, фотоны теряют свойство беспрепятственно проходить через вертикальный фильтр. Следовательно, скрытые переменные взаимодействуют с фильтрами и изменяются ими. Все же это еще не довод против возможности детерминистической модели. Индетерминизм остается лишь угрозой, вероятности могут оказаться просто занавесью.

2. Причинность в индетерминистическом мире.

Многое ли удастся сохранить в современной картине мира, если детерминизм будет исключен? Физики, разумеется, не обладают логическими гарантиями того, что вышеупомянутые вероятности атомного распада и фотонной абсорбции нередуцируемы и фундаментальны. Они, однако, открыты идее индетерминизма и не так уж убеждены, что теория должна быть детерминистической, чтобы быть полной.

Рейхенбах работал над основаниями теории относительности, и он показал, как эти основания могут быть поняты как описывающие причинную структуру

мира. Причинность, с его точки зрения, является ключевым понятием, позволяющим уяснить смысл этой новой и революционной теории. Следует, правда, добавить, что причинность в его анализе – весьма минимальная, и не ничего не добавляет к тому, что любой философ понимает под причинностью. Структура пространства-времени, по Рейхенбаху, определяется реляционной структурой, составленной связями между событиями, связями посредством передачи энергии и материи.

Столкнувшись с тем, что квантовая механика предполагает более радикальный отход от классической причинности, Рейхенбах снова занялся понятием причинности. Традиционно причинность не отделяется от детерминизма. Лукреций, рассматривая мир атомов, правда, не наделял его детерминизмом. Хотя все взаимосвязи между событиями были у него причинными (через транспорт материи), атомы подвергались легким непредсказуемым отклонениям. Рейхенбах также считал, что мир имеет определенный причинный порядок, но не является детерминистичным. Нельзя ли квантовомеханический мир понять аналогичным образом?

Но какая теория в таком случае считалась бы полной? Полнота не может предполагать детерминизм, если исчерпывающий обзор всех реальных факторов не предполагает детерминизм. Индивидуальные события наступают спонтанно, возможно без всяких к тому оснований. Это значит, что мир перед нами индетерминистический. Но как «судить» теории в отношении этого мира? Рейхенбах ответил следующим образом: теория дает причинное объяснение не индивидуальных событий, а корреляций. В индетерминистическом универсуме могут присутствовать далеко идущие регулярности, имеющие форму статистических корреляций, и теоретическая реконструкция этих корреляций не должна быть тривиальной. Его программа понимания теории относительности исходила из принципа близкодействия: все воздействия протекают таким образом, что они соответствуют тому, что определено как непрерывный процесс. Он думал, что и квантовая механика может быть понята таким же образом. Наша задача здесь – проанализировать его подход.

Ясно, что некоторые корреляции могут быть объяснены логически. Монета падает на орла, если она не падает на решку. Но здесь орел и решка – два значения одного параметра. Это предельный случай, и только крайний рационалист, экстремист среди рационалистов, может допустить, что

корреляции сводимы к логике. Корреляция между курением и раком легких не относится к таким совершенным, как «орел – решка». Однако и в этом случае две величины, назовем их А и В, статистически связаны так, что $p(A/B) \neq p(A)$. Это симметричное отношение между А и В (если ни одна из них не имеет нулевую вероятность), оно может быть записано как $p(A \text{ и } B) \neq p(A)p(B)$. Но мы объясняем его, прослеживая общую причину, в данном случае – курительную историю пациента.

Вы это можете легко себе представить. Врач говорит, что следующий его пациент (которого он не знает) будет иметь рак легких с вероятностью в 10%. Если пациент приходит и начинает курить одну сигарету за другой, врач поднимает эту вероятность до 15%. Но если врач знает курительную историю пациента, та вероятность, которую врач выводит из нее, не изменится с наблюдением за поведением пациента. Это и понятно. Курительная история пациента позволяет понять как и его поведение в ходе приема, так и его состояние здоровья. Более того, курит ли сейчас пациент и как он курит не влияет на *нынешнее* состояние его легких (на наличие сейчас рака легких) – это лишь индикатор курительной истории, которая реально определяет нынешнее состояние. Таким образом у нас есть общая причина С для корреляции между А и В. Введем следующее ее определение.

- 1) С предшествует А и В,
- 2) $P(A/C) P(A/\text{не } C)$ и $P(B/C) P(B/\text{не } C)$
- 3) $P(A \text{ и } B/C) = P(A/C) P(B/C)$

Условие три – решающее: предшествующий фактор С не только поднимает вероятности А и В, но также экранирует А от В. Заметим, что если бы мы опустили (1), то (2) и (3) легко выполнимы при $C = (A \& B)$. Но если (1), т.е. отношение временного порядка, опущено, то нету и причинного объяснения.

3. Дедукция неравенства Белла.

Неверно, что всякое возможное явление имеет причинную модель. Первое доказательство этого дал Джон Белл (1964, 1966). Он не предполагал, что эта модель должна быть таковой, чтобы соответствовать квантовой механике или какой-либо другой теории. Он показал, что любая такая модель должна удовлетворять некоторым условиям – неравенствам Белла – и что это удовлетворение – вопрос не логики, а факта.

3.1. Поверхностное описание явления.

Пусть два генерала хотят победить их общего противника одновременно неожиданно и с разных сторон. Чтобы избежать утечки информации, они попросили некоего физика сконструировать приспособление, которое даст каждому из них сигнал в непредсказуемый момент времени. Физик дает каждому из них по приемнику с тремя каналами приема и конструирует источник, который продуцирует (с известной частотой) пары частиц, идущих к этим приемникам. В каждом приемнике имеется перегородка, если частица проходит через эту перегородку, загорается красная лампочка. В противном случае – загорается зеленая. Вероятность этого события зависит от того, какой канал выбран. Но когда два генерала выбирают один и тот же канал, одна частица из пары проходит через перегородку тогда и только тогда, когда другая не проходит. Генералы сошлись на одном из каналов и договорились включать свои приемники на одну минуту каждое утро в 8.00. Один из них начнет атаку тогда, когда загорится красная лампочка, а другой – когда загорится зеленая.

Ясно, что то, что случится с генералами, не зависит от какой-либо теории и перед нами просто корреляция. Прежде чем попытаться найти объяснение этой любопытной корреляции, я представлю ситуацию в общей и точной форме.

3.2. Экспериментальная ситуация.

Проводятся два эксперимента, каждый на одной из двух частиц (левой – L и правой – R), испущенных из одного источника. Каждый эксперимент может быть организован тремя способами. Высказывание о том, что эксперимент первого вида проведен над левой частицей, обозначаем как L1, и также в отношении всех других экспериментов.

Каждый эксперимент имеет два возможных исхода: 0 (зеленый сигнал) и 1 (красный). Высказывание о том, что эксперимент второго вида, проведенный над правой частицей, имеет исход 0, обозначаем как R20. Также в отношении всех других экспериментов и исходов. Заметим, что L1 эквивалентно дизъюнкции L11 и L10. С целью общности я ввожу индексы i, j, k , пробегающие 1,2,3 и a, b , пробегающие 0,1. Кроме того, пусть $\neg x = 1-x$, так что $\neg a$ есть исход, противоположный a .

Ситуация, в которой два эксперимента проводятся над одной парой частиц, описывается в терминах поля высказываний, генерируемых логическим разбиением.

$$PR_{\text{surface}} = \{Li \& Rjb: i, j = 1, 2, 3 \text{ и } a, b = 0, 1\},$$

которое насчитывает 36 различных членов. Примером такого высказывания служит следующее:

Настройка на левую частицу = $L1$ = дизъюнкция высказываний

$L1a \& Rjb$ для a, b из $\{0, 1\}$ и j из $\{1, 2, 3\}$ и т.д. Итак, у нас есть ресурс, чтобы описать на поверхностном уровне любой факт.¹

3.3. Поверхностные вероятности.

Вероятности для этих высказываний возникают по двум причинам. Во-первых, у нас может быть некоторая информация о том, как будут выбраны две настройки (может быть, чтобы гарантировать случайность, путем бросания кости). Это дает вероятности для высказываний, возникающих путем разбиения $PR \text{ choice} = \{Li \& Rj: i, j = 1, 2, 3\}$

Во-вторых, у нас может быть гипотеза или теория, дающая информацию об исходах различных экспериментов. Поскольку существует корреляция, информация принимает форму функции

$$P(Li \& Rjb | Li \& Rj) = p,$$

дающую вероятности исходов a и b для экспериментального устройства $Li \& Rj$.

Давайте назовем функцию P поверхностным состоянием. Заметим, что это не вероятностная мера над нашим полем, но она может быть расширена на него путем соединения с вероятностным рассмотрением $PR \text{ choice}$ (которое может быть названо взвешиванием выбора). Такая вероятностная мера над всем полем может быть названа тотальным состоянием. Гипотезы, касающиеся поверхностного состояния непосредственно проверяемы. Мы просто выбираем тот или иной способ проведения эксперимента, запускаем источник и считаем частоту – если следовать нашей истории – частоту вспышек.

¹ Речь идет о дизъюнкции $L11 \& R11 \vee L12 \& R11 \vee L11 \& R12 \vee L11 \& R22$ и т.д.