

Время, хаос и законы природы *

И.Р. Пригожин

Для меня большая радость и честь выступить с лекцией здесь, в Московском университете, и мне приятно видеть в аудитории много молодёжи. Я попробую говорить по-русски, я говорил по-русски с родителями, но это было давно и поэтому прошу извинить, если не смогу подобрать нужных слов. В последнее время в моей группе работает много сотрудников из России и я много узнал нового у русских математиков и физиков, достижения которых сыграли большую роль в этом веке. Ректор попросил меня выступить с общей лекцией. Общую лекцию читать очень сложно – одни будут говорить, что это тривиально и неинтересно, другие скажут, что это трудно и непонятно. Я попробую найти середину. В 1994 г. совместно с Изабеллой Стенгерс вышла моя книга "Время, хаос, квант". С тех пор были сделаны продвижения, проверки теории, но основные идеи остались, так что вы можете найти их в этой книге.

Мы находимся в конце XX века и возникает вопрос: что будет с наукой в будущем? Многие учёные считают, что мы находимся в конце науки. Так, в своей знаменитой книге Стивен Хокинг утверждает, что ещё немного, и мы будем иметь единую теорию и тогда мы всё будем знать. Но я думаю, что мы только в начале науки. Классическая наука всегда подчёркивала стабильность, равновесие, а мы в последние годы видим другой мир: нестабильность, флуктуации, эволюцию. И для описания такого рода явлений необходимы другие концепции, другие математические методы – такие, например, как методы теории нелинейных динамических систем и т.д., которые только теперь мы начинаем применять.

И в этом новом круге явлений большую роль играет отклонение от равновесия: чем дальше от равновесия, тем больше возникает разных структур. Это обстоятельство является новым для науки: раньше считали, что при отклонении от равновесия возникает беспорядок, но это не так. Наоборот, в действительности получаются разные новые порядки. При этом стрела времени, необратимость играют всё большую и большую роль. Возникает проблема – как соединить стрелу времени, необратимость со знаменитыми законами Ньютона, Шредингера и Эйнштейна?

Я очень заинтересовался номером журнала "Scientific American" за октябрь 1994 г., который назывался "Жизнь Вселенной". В нём каждый учёный рассказывает о своей

*Статья подготовлена к печати по конспектам и аудиозаписи доклада И.Р. Пригожина, сделанного на открытии семинара "Время, хаос и математические проблемы" в Московском государственном университете 9 ноября 1995 года. При этом для удобства читателей использованы материалы книги: И. Пригожин, И. Стенгерс "Время, хаос, квант" М., Прогресс, 1994 г. Составители и редакторы стремились максимально сохранить стиль устного выступления.

области науки: история космологии, история материи, история жизни, история человека. И там есть только одна статья физика Вайнберга, моего коллеги, в которой он пишет, что необратимость и эволюция – непонятные явления, так как всё основано на квантовой механике, а в основе квантовой механики лежит уравнение Шредингера, в котором нет разницы между будущим и прошлым. Он утверждает, что согласовать это возможно только единственным образом – наши размеры, когда мы измеряем что-нибудь, дают необратимость. Но я никак не могу с этим согласиться, так как тогда получается, что это мы являемся причиной эволюции Вселенной. Я думаю, что это неправильно. Мы – дети эволюции, а не создатели её, и, значит, мы должны искать другие причины эволюции.

Идею о том, что мы играем специальную роль во Вселенной, сейчас можно найти во многих новых книгах, выходящих в Англии или Америке. В своих книгах Хокинг полагает, что Вселенную достаточно описать чисто геометрически, что время – это иллюзия. Однако для человека время совсем не иллюзия. И поэтому в Америке сейчас очень популярен антропологический принцип, согласно которому человек "есть мера всех вещей". Если объединить эти два подхода – геометрическое описание и антропологический принцип, – то вернёмся назад, к дуализму XVII века Декарта. Это трудно принять сегодня, в конце XX века.

XIX век оставил нам в наследство два фундаментальных подхода: детерминистический – это законы классической механики, а также возникших позже законы квантовой механики и общей теории относительности Эйнштейна, и, по сути дела, вероятностный – это термодинамика. А термодинамика содержит идею эволюции, что мир не застыл, он развивается. И перед нами стоит выбор одной из этих двух идей. Карл Поппер, философ, которого я хорошо знал, говорил мне, что мы не знаем, в каком мире мы живём. Как в кинематографе – сидим и смотрим какой-нибудь фильм – кто-то будет убит, кто-то убийца, но мы этого не знаем, а знает тот, кто сделал этот фильм. Другими словами, мы ничего не можем познать. Иная крайность – детерминистическая – что всё определено, когда заданы начальные условия. Главный вопрос – как выбрать между этими двумя видениями Вселенной.

Однако я предлагаю иной подход – что будущего ещё нет, оно в процессе конструирования, в котором мы все – по мере возможностей, конечно, – можем участвовать. Как раз в последние десятилетия появились новые идеи, позволяющие предложить такой подход.

Традиционный подход состоял в том, что термодинамическое описание – это аппроксимация, что фундаментальным описанием является ньютоновское описание, квантовомеханическое или общей теории относительности. И этот подход до сих пор популярен. Но я думаю, что он не может быть правильным, так как снова мы получаем, что эволюция Вселенной происходит из-за нашей аппроксимации, т.е. нашей ошибки.

Мне кажется, что более правильно было бы попытаться изменить, обобщить законы и классической механики и квантовой. Я развиваю именно этот подход. Когда я занимался термодинамикой неравновесных процессов, я был удивлён, что новые явления, которые

были открыты в России – реакция Белоусова-Жаботинского, например, – не были широко известны в России. Помню, много лет тому назад я рассказывал об этой реакции на семинаре П.Л. Капицы, и он сказал, что никогда не слышал об этой реакции, а она стала очень известной, так как представляет собой так называемые ”химические часы” – жидкость становится красной, потом синей, потом снова красной и т.д., с периодом около минуты. Она является превосходным примером нелинейных каталитических реакций, приводящих к сильно неравновесным процессам. Каков механизм этой реакции? Это новый вид когерентности, новый кооперативный эффект. Эта реакция показывает, что вне равновесия существуют кооперативные эффекты, которых нет в равновесии. В последние годы были обнаружены структуры Тьюринга. Алан Тьюринг в 1952 г. предложил гипотезу о том, что взаимодействие между нелинейными химическими реакциями и диффузией может приводить к образованию пространственных структур. Это, можно сказать, новая кристаллография, неравновесная кристаллография.

Вне равновесия возникают разнообразные новые структуры, рождается хаос и т.д. И мы знаем теперь, что вся природа вокруг нас – и жизнь в том числе – не могла бы существовать без такого рода возможностей, что все эти структуры – биологические и другие – возможны только в неравновесном состоянии. Поэтому сказать, что неравновесие – это результат наших аппроксимаций – это неправильно. И поэтому я стал искать новые формулировки, в которых неравновесие играет конструктивную роль, и в которых неравновесие лежит в основе законов природы.

Этот вопрос всегда интересовал учёных. Эйнштейн был убеждённый детерминист. Он писал, что ”если вы спросите Луну, почему она ходит, Луна наверное сказала бы, что любит гулять, но мы, конечно, знаем, что Луна должна подчиняться Ньютонским законам движения, а не гуляет сама по себе”. Также он считал, что человек не может делать то, что хочет, что человек детерминистичен. Интересно, что хотя Ньютона считают детерминистом, на самом деле он не был детерминистом. Он считал, что Вселенная должна эволюционировать. Он даже писал, что согласно современным ему законам движения планетарная система должна разрушиться. Поэтому он считал, что через несколько веков или тысячелетий будут открыты новые законы движения планет.

Этот вопрос, конечно, очень старый – его ставили ещё древнегреческие философы – Демокрит и др. Но сейчас мы можем увидеть его в новом свете. Две теории позволяют нам увидеть в новом свете этот старый вопрос – это, во-первых, термодинамика необратимых процессов, изучая которые мы видим, что необратимость приводит к образованию новых структур. А когда мы видим в реальности эти новые структуры, то мы уже не можем сказать, что это иллюзия, что время – иллюзия. Точно также можно сказать, что гравитация – иллюзия, но очевидно, что это неверно. Во-вторых, – это динамика неустойчивых систем. Неустойчивые системы были в центре внимания российских физиков и математиков – таких как Ляпунов, Колмогоров, Арнольд, Синай и др., – то есть как предмет исследования это не является новым, но здесь есть новые результаты. И эти результаты приводят к новой идее – и это, пожалуй, главная тема моей лекции,

– что, как в классической механике, так и в квантовой, явления можно описывать на двух уровнях: детерминистически, на уровне отдельных траекторий, и статистически, на уровне ансамблей траекторий. Последние были введены в физику Гиббсом и Эйнштейном для термодинамики. Всегда считалось, что эти два уровня описания эквивалентны – если есть индивидуальное описание, то можно получить статистическое, и наоборот. Но в последние годы мы показали, что это верно для устойчивых систем, но это неверно для неустойчивых систем. Для неустойчивых систем существуют статистические описания, которые невозможно свести к описанию на уровне траекторий или волновых функций. Мы поняли, что в общем случае законы физики могут быть сформулированы только в вероятностном смысле, но не в детерминистическом. Конечно, есть простые системы, для которых возможно детерминистическое описание – например, движение Земли вокруг Солнца. Но статистические элементы начинают играть существенную роль даже в таких системах, как система трёх тел. В последнее время было показано, что если вначале три тела движутся по определённым орбитам, то в некоторый момент времени одно тело уходит на бесконечность, а два других движутся взаимосвязанно. Однако этот момент времени невозможно определить, а удаётся найти только распределение вероятности для него. Таким образом, даже для такой, казалось бы, простой задачи классической механики как проблема трёх тел существует только вероятностное решение.

Самые простые системы, на которых ясно видно различие между вероятностным и детерминистическим описанием – это системы с детерминированным хаосом. Так называют динамические системы, для которых характерно экспоненциальное разбегание траекторий. Для них фактически не существует траекторного описания, так как даже если начальные условия известны точно, их эволюция спустя небольшой промежуток времени является полностью непредсказуемой. Таким образом, системы с детерминированным хаосом не поддаются траекторному описанию, а могут быть описаны только вероятностно.

Что такое порядок и беспорядок? На протяжении долгого времени турбулентность в жидкости считали прототипом беспорядка, а кристалл считали воплощением порядка. В настоящее время показано, что турбулентная система "упорядочена": движение двух частиц, разделённых макроскопическими расстояниями (измеренными в сантиметрах), остаются коррелированными. Верно и обратное утверждение: атомы, образующие кристалл, колеблются несогласованным образом вокруг своих равновесных положений, и с точки зрения мод колебаний (тепловое движение) кристалл неупорядочен. Например, построение сложных биологических молекул становится возможным за счёт разрушения других молекул в ходе метаболических процессов. Таким образом, мы имеем дело со взаимосвязанными процессами, соответствующими в целом положительному производству энтропии. И порядок, и беспорядок являются неотъемлемыми составными частями и продуктами коррелированных эволюционных процессов.

Открытие диссипативных структур, т.е. структур, существующих за счёт рассеяния энергии, было совершенно неожиданно. Под "диссипативными структурами" принято

понимать организованное поведение, которое может при этом возникнуть (взаимосвязь диссипации, обусловленной порождающей энтропией активностью, и порядка, нарушенного самой диссипацией). Исследованием диссипативных структур занимались гидродинамика и химическая кинетика. В гидродинамике – это неустойчивость Бенара. В тонком слое жидкости поддерживается разность температур между нижней (подогреваемой) поверхностью и верхней поверхностью, находящейся при комнатной температуре. При малой разности температур, т.е. вблизи равновесия, перенос тепла осуществляется за счёт теплопроводности, т.е. столкновений между молекулами. Выше определённого порога разности температур тепло переносится за счёт конвекции, т.е. молекулы участвуют в коллективных движениях, соответствующих вихрям, разделяющим слой жидкости на регулярные "ячейки" – вихри Бенара. Возникновение коллективного движения означает спонтанное нарушение пространственной симметрии.

Неравновесные связи допускают возникновение новых состояний материи, свойства которых отличаются от свойств равновесных состояний. При этом большую роль играют корреляции, описывающие молекулярно-статистическое поведение системы. В отличие от равновесных состояний, корреляции для сильно неравновесных состояний могут охватывать макроскопические расстояния порядка сантиметра или более. Таким образом, сильно неравновесные необратимые процессы могут приводить к образованию огромного множества типов структурированного коллективного поведения. Мы приписываем таким системам "автономию" или "самоорганизацию". Сильно неравновесные связи являются условием самоорганизации, но самоорганизация в свою очередь изменяет эти связи.

Неустойчивость состояния системы можно описать с помощью флуктуаций. Равновесное состояние системы можно задать посредством средних значений, поскольку состояние равновесия устойчиво относительно флуктуаций, которые непрерывно возмущают эти средние значения. Вблизи состояния равновесия второе начало термодинамики гарантирует, что флуктуации затухают и в конце концов пропадают. Состояние, близкое к равновесию, экспериментатор может контролировать. Системы, в которых неконтролируемые флуктуации могут усиливаться и играть решающую роль, не могут быть контролируемы. К числу таких систем относятся сильно неравновесные системы.

Таким образом, неустойчивость означает, что флуктуации могут перестать быть просто "шумом" и превратиться в фактор, направляющий глобальную эволюцию системы.

При переходе от простого к сложному большое значение имеют "аттракторы", т.е. конечное состояние диссипативной системы. В прошлом считалось, что все системы, эволюция которых связана с существованием аттрактора, одинаковы. В настоящее время мы придерживаемся противоположной точки зрения: понятие аттрактора связано с разнообразием диссипативных систем. Состояние термодинамического равновесия является аттрактором: популяция из миллиардов и миллиардов частиц, образующих изоли-

рованную систему, эволюционирует к состоянию равновесия, описание которого зависит от немногих параметров, таких как температура и давление.

Не все диссипативные системы приходят к одной-единственной конечной точке. Например, сильно неравновесная диссипативная структура, известная под названием "химические часы", эволюционирует не к какому-нибудь состоянию, а к устойчивому периодическому режиму. Такая ситуация приводит к необходимости обобщения идеи аттрактора: аттрактор здесь не точка, а линия, описывающая периодическое изменение во времени концентрации химических веществ в системе. В этом случае при любых начальных условиях система эволюционирует к этой траектории – "предельному циклу".

В других случаях, пытаясь построить изображение аттрактора, мы получаем не точку или линию, а поверхность. Полной неожиданностью стало открытие аттракторов, не имеющих простые геометрические формы, которые называют "странными аттракторами". В отличие от линии или поверхности, странные аттракторы характеризуются не целыми, а дробными размерностями. Они являются "фрактальными" объектами. Термин "фрактал" был введен Бенуа Мандельбройтом, который впервые идентифицировал этот новый важный класс геометрических объектов. Классическим примером фрактального объекта может служить *канторово множество*.

Подобно канторовому множеству, "фрактальный" аттрактор обладает необычайно тонкой структурой, которая влечёт за собой очень сложное временное поведение. Если ранее существование аттрактора было синонимом устойчивости и воспроизводимости – выхода на "то же самое" при любых начальных условиях, – то новые аттракторы с дробными размерностями порождают такие типы поведения, которые невозможно ни предсказать, ни воспроизвести. Такой аттрактор определяет режимы, "чувствительные к начальным условиям". Системы, чувствительные к начальным условиям, не допускают грубого описания в терминах детерминистической причинности. В этом случае мы приходим к определению "хаотического режима", типичного для систем со странным аттрактором, фрактальным или нефрактальным. Режим называется хаотическим, если расстояние между любыми двумя точками, первоначально сколь угодно малое, экспоненциально возрастает со временем. Разбегание траекторий описывается функцией $\exp(t/\tau)$, где $1/\tau$ – показатель Ляпунова, а $\tau > 0$ – время Ляпунова. Время Ляпунова позволяет нам ввести внутренний "масштаб времени" для хаотических систем, т.е. интервал времени, в течение которого выражение "две одинаковые" системы, соответствующие одним и тем же начальным условиям, сохраняет смысл (допускает в определённой мере предсказание). После достаточно продолжительного по сравнению с временем Ляпунова периода эволюции, память о начальном состоянии системы полностью утрачивается: задание начального состояния не позволяет более определить траекторию.

В настоящее время мы находимся очень далеко от предсказуемого мира, управляемого точечноподобными аттракторами, которые доминировали в равновесной физике. Современные аттракторы служат великолепной иллюстрацией разнообразнейшего поведения диссипативных систем. Живые системы полностью используют это разнообразие.

Некоторые из основных механизмов регуляции обмена веществ соответствуют предельным циклам, в то время как активность мозга связана с хаотическими аттракторами.

При ослаблении неравновесных связей гидродинамические структуры исчезают, тогда как химические процессы производят продукты, сохраняющие память о необратимых процессах, которые привели к их образованию. Таким образом, необратимость сказывается не только на переходных модах режима. Через химическую необратимость она запечатлевается в веществе.

Возникновение хаоса на микроскопическом динамическом уровне имеет далеко идущие последствия. Именно оно является основной причиной, по которой нам приходится отказаться от традиционного описания на основе детерминизма и перейти к вероятностному описанию.

Для распределений вероятностей можно написать уравнения и решать, анализировать их. Это является новым, так как вводятся операторы, действующие на распределения вероятностей, но не в квантовой механике, а в теории неустойчивых динамических систем. Со времени возникновения квантовой механики прошло много лет, и теперь все знают, что операторы в гильбертовом пространстве представляют в математическом аппарате квантовой механики наблюдаемые физические величины. Но здесь сразу оказывается, что спектр этих операторов нельзя получить в гильбертовом пространстве, так как эти операторы действуют на сингулярных функциях, не лежащих в гильбертовом пространстве. Хаос заставляет нас отказаться от гильбертова пространства и перейти к оснащённым пространствам, структура которых зависит от конкретного вида неустойчивости. Оснащённые пространства впервые были введены крупным российским математиком И.М. Гельфандом и его учениками в связи с проблемами квантовой механики – когда возникают обобщённые функции типа δ -функции – и необходимо выйти из гильбертова пространства. Но они не занимались проблемами хаоса и неустойчивости. Связь между оснащёнными пространствами и хаосом стала понятной сравнительно недавно. Хаотические системы, не допускающие детерминистическое описание, в оснащённых пространствах получают адекватное описание.

А вне гильбертова пространства ситуация становится более привлекательной, так как в гильбертовом пространстве невозможно получить описание необратимых явлений потому, что операторы динамики – это специальный класс операторов, так называемые симметрические операторы, и в гильбертовом пространстве они имеют только действительные собственные значения и могут описывать только периодические явления. Таким образом, физическая проблема приводит к необходимости нового математического аппарата – исследования спектра операторов в негильбертовом пространстве. Конечно, здесь, в Московском университете спектральная теория операторов широко представлена и ректор, Виктор Антонович Садовничий, является большим специалистом по этому вопросу.

Для меня это обстоятельство, т.е. необходимость выхода из гильбертова пространства, было очень удивительным. Я раньше работал по интуиции, я не математик и воз-

никали определённые трудности. И вот мои сотрудники – Антониу, Петроски, Хасегава – они сказали мне – то, что вы хотите сделать, это невозможно получить в гильбертовом пространстве, это можно сделать только в более общих пространствах. В них можно получить новые результаты, можно получить описание необратимых явлений. Таким образом, для неустойчивых систем, чтобы получить их эволюционную природу и необратимость, необходима новая математика, теория операторов в негильбертовых пространствах.

И это возвращает нас обратно к идеям Гейзенберга, к началам квантовой механики. Он всегда полагал, что все наблюдаемые явления можно описать с помощью операторов, которые представляют природу. Но он мне говорил, что хочет получить из операторов не только спектральные линии, а также и ширину спектральных линий, а это, конечно, связано с необратимостью. И он был удивлён, что может получить только спектральные линии, а не их ширину. Вообще можно сказать, что мы идём дальше в направлении идей Гейзенберга: хотим получить больше от спектральной теории операторов.

Конечно, системы с детерминированным хаосом – это простые системы. Рассматривая общие гамильтоновы системы, мы должны понять, почему необходим выход из гильбертова пространства. Но мы знаем, что есть такие реальные системы как газ, жидкость. В их поведении мы наблюдаем необратимость, так как это известный факт термодинамики. А в чём заключается различие между процессами в простых системах и необратимыми процессами? Простые системы начинают движение, затем взаимодействуют, а затем расходятся на большие расстояния, т.е. они асимптотически свободны (при $t \rightarrow \pm\infty$) – их движение начинается и кончается. Но вот здесь, в зале есть воздух – для него это неверно. Для таких систем движение никогда не кончается. В любой момент времени происходят столкновения, и в данный момент времени нельзя определённо сказать каково состояние системы в классическом смысле. Система является делокализованной во времени. И вот эта-то делокализация и даёт всю разницу.

Когда я был студентом, меня заинтересовало следующее обстоятельство: для уравнения Больцмана существенную роль играют столкновения частиц, а они – самые простые механические явления, которые описываются уравнениями Ньютона! И в то же время уравнение Больцмана очень хорошо согласуется с экспериментом. Те, которые занимаются газами, плазмой – они используют это уравнение до сих пор! Какая разница между уравнением Больцмана и уравнением Ньютона? В уравнении Больцмана столкновения никогда не начинаются и никогда не кончаются, а идут всё время! Они делокализованы во времени. И мы должны брать делокализованные функции для описания таких систем, а такие функции не лежат в гильбертовом пространстве (это можно показать строго). Я не буду это доказывать, но это просто понять, так как их преобразования Фурье являются сингулярными функциями и поэтому сами функции должны выйти из гильбертова пространства.

Итак, вероятностное описание происходит в негильбертовом пространстве, и там можно получить новые результаты, которые согласуются с термодинамикой, с теори-

ей необратимых процессов. Можно получить микроскопическое описание энтропии и H -функции, которую ввёл ещё Больцман, чтобы вывести необратимость из уравнений движения классической механики. Но тогда ему возражали, и даже Пуанкаре сказал, что невозможно вывести необратимость из обратимых по времени уравнений движения Ньютона. В определённом смысле Пуанкаре был прав, но тогда ещё не было функционального анализа, теории неустойчивых систем. Теперь же даже для неустойчивых систем можно построить H -функцию. Строгое построение H -функции очень важно, так как именно она показывает, почему невозможно путешествовать во времени. В детерминистической физике есть два независимых элемента – это уравнения движения и начальные условия, а в системах, в которых есть направление времени, которые описываются полугруппой, – это не так. Потому что, если есть направление времени, то есть тенденция к равновесию, тогда можно показать, что каждое начальное условие приводит либо к равновесию, либо далеко от равновесия, либо бесконечно далеко от равновесия. И можно создать начальные условия для системы, которые имеют конечные энтропию и H -функцию. А что это значит? Что значит вообще динамическая эволюция? Если система состоит из многих частиц, то они сталкиваются, имеют место корреляции – 2-х, 3-х, 5-и и т.д. частиц, поток корреляций. А если пытаться обратить динамику, тогда надо обратить поток корреляций, а это невозможно – если есть две частицы, которые коррелировали 10 лет тому назад и чтобы они опять коррелировали? И это показывает, что если обратить скорости, то новая H -функция "прыгнет", и очень скоро опять "прыгнет" и т.д. Отсюда следует, что время нельзя обратить.

Эддингтон ввёл понятие стрелы времени. Время, как оно введено в фундаментальных законах физики от классической динамики до теории относительности и квантовой механики, не содержит в себе различия между прошлым и будущим. В этом случае стрелы времени нет. Парадокс времени не был осмыслен вплоть до второй половины XIX века. К этому моменту законы динамики воспринимались как идеал объективного знания. А поскольку из этих законов следовала эквивалентность между прошлым и будущим, всякая попытка придать стреле времени фундаментальное значение наталкивалась на сопротивление как угроза идеалу объективного знания. Необратимость играет существенно *конструктивную* роль. Невозможно представить себе жизнь в мире, лишённом взаимосвязей, создаваемых необратимыми процессами.

В макроскопической физике, химии, биологии, геологии, гуманитарных науках будущее и прошлое играют различные роли. Существование стрелы времени здесь очевидно. Каким образом может возникнуть стрела времени из фундаментальных законов физики? Каким образом она может возникнуть из симметричного по времени мира? Возможно ли, что воспринимаемое нами время не более, чем иллюзия? Эти вопросы приводят к парадоксу времени.

Парадокс времени ставит перед нами проблему центральной роли "законов природы". Отождествление науки с поиском "законов природы" является одной из концепций западной науки. Прототипом универсального закона природы служит закон Ньютона,

который можно сформулировать так: ускорение пропорционально силе. Этот закон имеет две фундаментальные особенности. Он детерминистичен: по начальным условиям мы предсказываем движение. Он обратим во времени: между предсказаниями будущего и восстановлением прошлого нет никакого различия (движение к будущему состоянию и обратное движение от текущего состояния к начальному эквивалентны). Закон Ньютона лежит в основе классической механики, науки о движении материи, о траекториях. С начала XX века с появлением квантовой механики и теории относительности границы физики расширились, однако основные характеристики закона Ньютона (детерминизм и обратимость во времени) сохранились.

В работе Эйнштейна, посвящённой самопроизвольному испусканию света возбуждённым атомом, сделано предположение, что "время и направление элементарных процессов определены случайным образом". Для описания поведения системы в области сильно неравновесных процессов необходимо использовать термодинамическую стрелу времени. Каким образом возможно изменить физические законы так, чтобы включить необратимость, события и стрелу времени?

Современная физика рассматривает стрелу времени как одно из существенных свойств реального мира. Кто мог бы предсказать лет тридцать назад, что неравновесность приведёт к самоорганизации в том виде, в каком мы наблюдаем её в гидродинамических неустойчивостях типа ячеек Бенара? Кто мог бы предсказать существование нестабильных частиц, хаотической динамики или эволюционной космологии? Вторжение времени в физику открывает путь новым формам объективной познаваемости.

Нарушение симметрии во времени на микроскопическом уровне вызвано хаотической динамикой систем. Стрела времени возникла в результате решения парадокса времени. Время не может возникнуть из невремени. Вневременные законы физики нельзя считать подлинным "отражением" фундаментальной истины физического мира. К фундаментальным законам физики относятся проблемы динамической неустойчивости. Исключение стрелы времени с необходимостью приводит к двойственному описанию: с одной стороны – к обратимым во времени микроскопическим законам с использованием траекторий или волновых функций, с другой стороны – к феноменологическим законам с нарушенной симметрией во времени.

С нашей точки зрения предоставление наблюдателю центрального места является следствием парадокса времени. Мы имеем доступ к квантовому миру только через актуальные события, объекты нашего вероятностного описания с нарушенной симметрией во времени. Квантовая механика показывает, что обратимый во времени мир, описываемый уравнением Шредингера, есть *непознаваемый* мир. Познание предполагает возможность воздействия мира на нас или наши приборы. Оно предполагает не только взаимодействие между познающим и познаваемым, но и то, что это взаимодействие создаёт различие между прошлым и будущим. *Становление* есть и неотъемлемый элемент реальности, и условие человеческого познания. В этом смысле организаторы Нобелевской конференции были правы. Мы подошли к "концу науки", к концу представления о клас-

сической рациональности. Традиционно существовали две формулировки физических законов: в терминах траекторий или волновых функций и в терминах статистических ансамблей. Но такая статистическая формулировка не была несводимой. Она была вполне применима к отдельным траекториям или волновым функциям. При статистическом подходе не появились новые динамические свойства. Необратимое приближение к равновесию было связано с "крупнозернистостью" описания, а стрелу времени приписывали неполноте нашего знания. В нашем подходе необратимость и вероятность становятся объективными свойствами: наблюдаемый нами физический мир не может быть сведён к отдельным траекториям или отдельным волновым функциям. Переход от ньютоновского описания в терминах волновых функций к описанию в терминах ансамблей не влечёт за собой потери информации. Наоборот, такой подход позволяет включить новые существенные свойства в фундаментальное описание неустойчивых хаотических систем. Свойства диссипативных систем перестают быть только феноменологическими. В квантовой механике ситуация ещё сложнее, так как нарушение симметрии во времени является необходимым условием для наблюдения квантового мира, т.е. для перехода от амплитуд вероятности к вероятности. В нашем подходе формулировки законов природы рассматриваются как состояния неустойчивых хаотических систем, которые мы отождествляем с существованием несводимых вероятностных представлений.

В классической динамике законы хаоса мы ассоциируем с описанием долговременной эволюции отображений и с интегрированием "неинтегрируемых" систем Пуанкаре. Наши методы дают нам алгоритмы более мощные, нежели алгоритмы классической динамики. В квантовой механике наши алгоритмы позволяют устранить трудности, стоящие на пути реализации программ Гейзенберга, т.е. решение задачи на собственные значения.

Причина успеха нового подхода кроется в переходе к более мощным математическим средствам. Хорошо известно, что задача, неразрешимая с помощью одного алгоритма, может стать разрешимой, если мы обратимся к другому алгоритму. Вопрос о существовании корней алгебраического уравнения неразрешим в области вещественных чисел (некоторые алгебраические уравнения могут не иметь ни одного вещественного корня), но стоит нам перейти в область комплексных чисел, как ответ становится очень простым: каждое алгебраическое уравнение n -й степени имеет n корней. Знаменитая теорема Гёделя утверждает, что не существует конечной аксиоматической системы, в рамках которой были бы разрешимы все проблемы. По этой причине отношение между проблемами и средствами, необходимыми для их решения, – процесс открытый, творческий, способный служить великолепной иллюстрацией творческого сознания.

В неинтегрируемых системах время играет двойную роль. Возникает естественное упорядочение, связанное с течением времени. Простейший тому пример – различие между запаздывающими и опережающими потенциалами. В общем виде это временное упорядочение может быть осуществлено с помощью ансамблей (статистический подход). Этот подход позволяет получать *несводимые* представления.

Все эти вопросы становятся ещё интереснее в квантовой механике, чем для классической. И хотя квантовой механике вот уже около 70 лет, но дискуссии по поводу квантовой механики продолжаются и теперь. Я был как раз несколько недель тому назад на конференции, где эти проблемы обсуждались, и действительно, в квантовой механике имеются дополнительные трудности. В классической механике есть один закон движения – это уравнения Ньютона, а в квантовой механике – два основных постулата – это уравнение Шредингера (симметрично во времени и детерминистично), и производимые нами измерения (стохастичность и необратимость согласно квантовой теории содержится в наблюдениях). Квантовая механика можно сказать, потенциальна: даже если известна волновая функция, нельзя сказать в каком именно состоянии находится система. Чтобы это узнать, необходимо произвести измерение, при котором волновая функция изменяется скачком, переходя из потенциальности в актуальность. Какова природа этого скачка? На этот вопрос квантовая механика не даёт ответа. И поэтому здесь возникают различные парадоксы типа Зенона и т.д., которые трудно понять.

В нашем новом подходе утверждается, что волновая функция – это не самый фундаментальный объект, что такое описание возможно только для простых систем. В общем случае здесь также надо взять распределение вероятностей, и уже не будет волновой функции, а будет функция распределения вероятностей, которая описывает все различные возможные состояния и нет больше этого перехода из потенциальности в актуальность – этот вопрос снят. И в рамках этого подхода, по-моему, можно теперь утверждать, что квантовая механика не могла бы быть полна без внесения в неё каких-либо метафизических утверждений.

Откуда, собственно, возникла квантовая механика? Она возникла, когда экспериментально было обнаружено, что каждая спектральная линия, её частота, равна разности двух уровней энергии. Это известный закон Ритца. И это привело в конце концов к построению квантовой механики. Но это верно только для действительных частей собственных чисел. Скажем, если взять такую квантовую систему как газ и наблюдать его приближение к равновесию, то можно определить это характеристическое время приближения – здесь нет разности между двумя временами, есть только одно время, одно число и нет никакого принципа Ритца для мнимой части собственного значения. Но это возможно только вне гильбертова пространства. Таким образом, снова приходим к выводу, что надо рассматривать квантовые системы в больших, чем гильбертовы, пространствах, где уже нет такого свойства, что наблюдаемая частота равна разности двух собственных чисел, иначе не было бы стремления к равновесию и необратимости квантовых систем. И это подтверждают многочисленные компьютерные эксперименты, проделанные в нашей лаборатории. Можно сказать, что всё, что мы говорили о классической механике, справедливо и в применении к квантовой механике.

Я всегда мечтал, что если бы я мог снова встретить Бора и Эйнштейна, я мог бы их переубедить в их дискуссии о квантовой механике. Какова была основная идея Бора, которого я хорошо знал? Бор полагал, что квантовая механика – это микроскопичес-

кая механика, а мы – в макроскопическом мире, значит, нужно нечто среднее, нужен измерительный прибор, который был бы между микроскопическим миром и макроскопическим. Это как в религии – вот есть бог, а вот – человек, и между ними должен быть священник. А каков должен быть этот прибор? Бор полагал, что прибор должен быть классическим. Но как можно иметь классический прибор в квантовой механике? Это невозможно. И поэтому копенгагенская интерпретация квантовой механики осталась весьма странной и непонятной, и до сих пор продолжаются попытки её пересмотра. Из нашего подхода следует, что прибор должен быть термодинамически неустойчивой системой, и он должен иметь то же направление времени, что и система. Я могу с вами разговаривать только потому, что ваше будущее – такое же, как и моё. Это общее будущее и есть время – самое главное объединение мира – всё, что мы знаем, имеет общее будущее. Оно, конечно, имеет космологическое происхождение. И измерительный прибор должен иметь такое же будущее, как и мы, чтобы мы могли получить от него информацию.

С другой стороны, что имел Эйнштейн против квантовой механики? Конечно, он был детерминист и, следовательно, не мог принять вероятностную интерпретацию квантовой механики. Но самое главное, что он не любил в квантовой механике – это роль наблюдателя, которому предоставлено право переводить систему из потенциальности в актуальность. Я тоже думаю, что это было бы очень странно, если бы человек играл такую роль, и, кроме того, как всё это согласовать с тем периодом истории, когда не было человека, с космологией? Какой должна быть квантовая теория для тех времён, когда нет никого, кто мог бы произвести измерения?! Так что я полагаю, что возможность разрешить такого рода проблемы на чисто динамическом уровне, предоставляемая нашим подходом – это несомненный прогресс, так как нет необходимости внесения неких метафизических построений, а просто необходимо использовать новый математический подход.

Разумеется, имеющиеся результаты позволяют говорить лишь о начальном этапе исследований, так как в конце-концов надо понять время в смысле космологии, а здесь мы приходим к вопросам теории поля и квантовой гравитации, которые ещё недостаточно ясны. Каждый человек, конечно, имеет своё мнение о том, в каком направлении могут быть получены ответы на эти вопросы.

Я думаю, что это будет реализация двух идей: одна – мечта Эйнштейна иметь объединённую теорию всех взаимодействий, включая гравитацию, другая – мечта Больцмана иметь эволюционирующую природу. А может быть, объединение только и возможно в эволюционирующей природе? Я, конечно, понимаю, что всё это пока очень спекулятивно. Мы ещё далеки от хорошей теории.

Но всё же можно сделать несколько общих выводов. В традиционных теориях – таких как очень красивая общая теория относительности или более современная калибровочная теория поля – природа имела геометрическое описание. Мы идём в направлении креативного описания эволюции, когда, как я сказал в начале лекции, всюду имеем ис-

торию: история космологии, история материи, история жизни и т.д. И может быть это и есть наша главная идея. природа – это как роман: имеет всё новые и новые элементы. Конечно, можно сказать, что очень жаль, что мы не можем всё предвидеть, но если бы мы могли всё предвидеть, то не было бы места для нового, для творчества, а я думаю, что способность к творчеству – это самое главное в человеке. Но в детерминистических теориях нет места для творчества. Эйнштейн, конечно, был одним из самых крупных физиков в истории, но с другой стороны, у него были противоречия: на одной странице он пишет о детерминизме, а на другой – о творчестве как чистой игре разума. По-моему, это противоречие. И мы должны его устранить. Известно, что в европейской традиции есть две идеи, которые мы получили в наследство от греков: одна – это понять природу и дать количественное объяснение природе, другая – это идея гуманистическая, когда есть человек, который может сделать выбор, когда мы настаиваем на свободе, на участии, на активности и т.д. Как эти две идеи могут сосуществовать, если природа детерминистична? Это значило бы, что мы вне природы, но человек XX века вряд ли согласится с этим и поэтому я полагаю, что прогресс физики, о котором я говорил, представляет интерес не только для физики, но и вообще для нашего понимания мира. Мне кажется, что мир, как мы его можем понять теперь, более естественный, чем мы могли вообразить его ранее.

Большое спасибо.

Список литературы

- [1] Пригожин И. Неравновесная статистическая механика. - М.: 1964.
- [2] Пригожин И., Дефей Р. Химическая термодинамика. - Новосибирск: 1966.
- [3] Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. - М.: 1973.
- [4] Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: 1979.
- [5] Пригожин И. От существующего к возникающему. - М.: 1985.
- [6] Пригожин И. Стенгерс И. Порядок из хаоса. - М.: 1986.
- [7] Пригожин И. Стенгерс И. Время, хаос, квант. - М.: 1994.



Автограф Нобелевского лауреата — ценный подарок, память на всю жизнь (ноябрь 1995 г.)

