

¹ кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики, ГУВЗ «ДГПУ»

² ассистент кафедры математики, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: fiziksgpu@yandex.ru

ПАРАДОКСЫ ВРЕМЕНИ В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ

В работе анализируются понятия «стрелы времени» и необратимости. Показано, что на всех уровнях структурной организации материи необратимость процессов связана со свойством неустойчивости соответствующих систем и процессов. Приведены материалы для создания проблемных ситуаций при изучении этих понятий.

Ключевые слова: *асимметрия времени, необратимость, стрела времени, второй закон термодинамики.*

Итак, что же в конце концов есть время, это неуловимое понятие, которое озадачивало Св. Августина, ввело в заблуждение Ньютона, вдохновляло Эйнштейна, мучило Хайдеггера?

М. Кастельс

Введение

В Нобелевской лекции академика В.Л. Гинзбурга в списке особенно важных и интересных проблем физики и астрофизики начала XXI века выделены три «великие» проблемы [1]. Одна из них — возрастание энтропии, необратимость и «стрела времени», т.е. вопрос, связанный со вторым началом термодинамики. В другой Нобелевской лекции один из отцов-основателей синергетики И.Р. Пригожин утверждает: «В истории науки второй закон термодинамики сыграл выдающуюся роль, далеко выходящую за рамки явлений, для объяснения сущности которых он был предназначен» [2].

«Увеличение энтропии отличает будущее от прошлого, поэтому существует стрела времени» [3, 92]. В школьном курсе и в общем курсе физики для высших учебных заведений содержание понятий необратимости и второго начала соответствует классической (равновесной) термодинамике. Появление во второй половине XX века неравновесной термодинамики и синергетики не учитывается, в то время как анализ понятия времени и необратимости пронизывает творчество И.Р. Пригожина.

Анализ противоречия мировоззренческих представлений классической механики и классической (равновесной) термодинамики может стать источником проблемных ситуаций при изучении данного материала. Это активизирует познавательную деятельность учащихся и повысит интерес к изучению физики.

Основная часть

Фундаментальные законы физики, законы классической, квантовой механики, теории относительности, обратимы во времени. Например, второй закон Ньютона

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}$$

инвариантен относительно обращения времени $t \rightarrow -t$. Структура уравнений механики такова, что при обращении скорости всех точек системы она будет эволюционировать назад во времени, проходя через все состояния в которых побывала в прошлом. Обратимые законы таковы, что по известным одному состоянию и действующим силам можно предсказать будущее и полностью восстановить прошлое. Т.е. в классической механике будущее и прошлое эквивалентны. Время является просто параметром.

Квантовая механика в этом отношении ситуацию не изменила. Обращая ход времени в уравнении Шредингера и в комплексно-сопряженном ему получаем

$$\frac{\hbar \partial \Psi}{i \partial t} = \hat{H} \Psi, \quad -\frac{\hbar \partial \Psi^*}{i \partial t} = \hat{H} \Psi^*$$

Отсюда следует, что плотность вероятности $|\Psi|^2 = \Psi \Psi^*$ возможных состояний при изменении знака времени не меняется. Необратимость в квантовой механике появляется лишь при измерении, а оно уравнением Шредингера не описывается.

Но, теории в которых время обратимо, не могут описывать процессы эволюции, процессы возникновения качественно новых состояний. В то время как процессы развития, эволюции мы наблюдаем на всех структурных уровнях организации материи. Как согласовать обратимость фундаментальных законов с наблюдаемой повсюду необратимостью природных процессов? Это противоречие И.Р. Пригожин назвал парадоксом времени. С ним тесно связаны квантовый и космологический парадоксы. «Задано ли будущее или находится в процессе непрерывного становления? В этом вопросе заключена глубокая дилемма для всего человечества, поскольку время — фундаментальное измерение нашего существования» [4, 9].

Согласованием обратимости законов механики с необратимостью нашего окружения в конце XIX века занимался Людвиг Больцман. Рассматривая совокупность движущихся и сталкивающихся молекул он показал, что столкновения приводят к установлению равновесия, т.е. являются механизмом, ответственным за выполнение второго начала. Но в то время его работа подверглась ожесточенной критике. Одно из самых важных возражений — поскольку движение по траектории обратимо во времени, то при изменении знака скорости молекул система должна вернуться в свое прошлое, в первоначальное состояние. Под напором критики Л. Больцман заменил предложенную им микроскопическую интерпретацию второго начала статистической. Изолированная система самопроизвольно переходит в равновесное состояние потому, что оно более вероятно. Т.е. необратимые процессы всего лишь более вероятны, чем обратимые.

Однако такая интерпретация не вносит полной ясности. Например, малая вероятность состояния не означает, что оно вообще невозможно. Усовершенствовав технику измерений можно было бы фиксировать все менее и менее вероятные события, что обесценило бы второе начало. Р. Смолуховский писал: «Если бы мы могли продолжить наблюдения неограниченно долго, то все процессы казались бы нам обратимыми» (Цитируется по [4, 26]). Кроме того, если можно было бы наблюдать за движением каждой молекулы системы, то, в соответствии с обратимостью законов динамики, состояние системы менялось бы обратимо. Из вышеизложенного следует, как подчеркивал М. Борн, что необратимость является результатом введения нашего незнания в фундаментальные законы физики, она объясняется тем, что мы вносим приближения в описание природы. «Время — это иллюзия» — говорил А. Эйнштейн.

Существовала и другая точка зрения. М. Планк считал абсурдным полагать, что справедливость второго начала зависит от нашего искусства проводить наблюдения или эксперименты. Но сторонников такого мнения было меньше.

Осознание того, что существование необратимых процессов не связано с точностью экспериментов и полнотой имеющейся у нас информации, пришло лишь во второй половине XX века вместе с появлением физики неустойчивых систем и теории хаоса. Причина необратимости — неустойчивость динамических процессов. Столкновение молекул в системе, которую рассматривал Л. Больцман, — неустойчивый процесс. Анализ устойчивости (неустойчивости) траекторий, стационарных состояний основан на исследовании поведения малых отклонений от анализируемого решения.

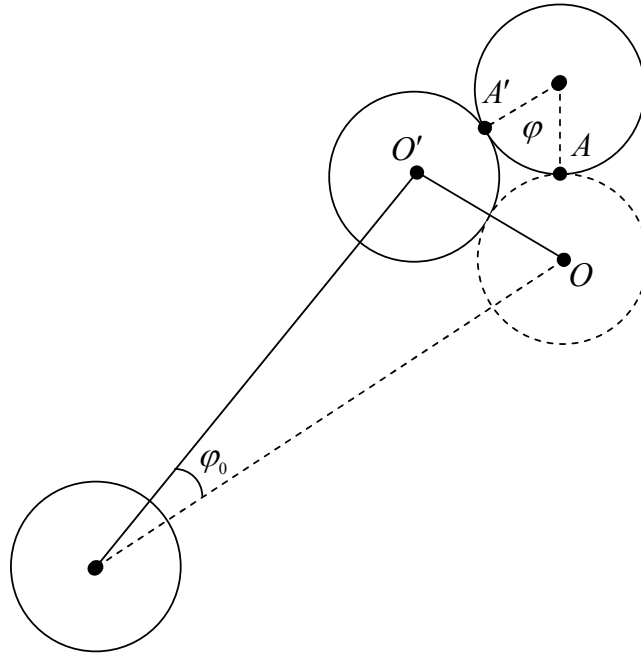


Рис. 1:

Рассмотрим роль неустойчивости в развитии системы на примере столкновения шаров (рис. 1).

Пусть направление движения одного из шаров отклонилось от заданного на маленький угол $\varphi_0 \sim 10^{-7}$. Выясним как будет меняться угол отклонения при последующих соударениях. Шар с радиусом r между соударениями проходит путь $l \gg r$. За время между двумя последовательными столкновениями центр шара сместится на расстояние $OO' \approx l\varphi_0$. Того же порядка и смещение точки соприкосновения шаров при ударе: $\varphi \approx \frac{AA'}{r} \approx \frac{l\varphi_0}{r}$. После z столкновений

$$\varphi_z \sim \left(\frac{l}{r}\right)^z \varphi_0 \quad (1)$$

(Здесь φ и φ_0 радианные меры соответствующих углов). Если $\frac{l}{r} \sim 10$, то после нескольких соударений направление движения шара не будет иметь ничего общего с невозмущенным, малейшее возмущение быстро нарастает.

Пусть $s = vt$ — длина пути, который проходит шар за время t , v — скорость движения. Если z — число столкновений за время t , l — среднее расстояние между столкновениями, то $s = zl$. Следовательно, $vt = zl$ и $z = \frac{vt}{l}$. Подставляя это выражение в соотношение (1) и логарифмируя,

получаем

$$\ln \frac{\varphi}{\varphi_0} \approx \frac{vt}{l} \ln \frac{l}{r}.$$

Если ввести обозначение $K = \frac{v}{l} \ln \frac{l}{r}$, то данное выражение можно переписать следующим образом: $\varphi \approx \varphi_0 e^{Kt}$. Если $K < 0$ — движение устойчиво, начальное отклонение быстро затухает. Если $K > 0$ — движение неустойчиво. Устойчивость (неустойчивость) — внутреннее свойство системы. Однако проявляется оно при наличии малых внешних воздействий.

Совокупность сталкивающихся молекул, находящихся в ограниченном объеме, — неустойчивая система. Движение молекул в таких системах очень чувствительно к малейшим возмущениям — со временем они (возмущения) экспоненциально нарастают. Если система находится в ограниченном пространстве, неустойчивые траектории не могут разойтись больше, чем на размер этой области и начинают перемешиваться. Описание системы с использованием понятия траектории становится бессмысленным, неадекватным. Чтобы траекторное описание имело смысл, она должна оставаться «почти одной и той же» при незначительном изменении начальных условий. Для глобально неустойчивых систем траекторное описание — недопустимая идеализация. Для таких систем имеет смысл говорить лишь о вероятности нахождения частицы в том или ином элементе объема. Вероятностное описание нарушает симметрию во времени. Обратимость в классической механике — следствие траекторного описания.

Но, поскольку в глобально неустойчивых системах траектории невоспроизводимы, обратимость в механическом смысле не имеет места. В таких системах устойчивыми могут быть средние значения. Обратимые термодинамические процессы, при которых система в любой момент времени находится в равновесии, возможны.

Таким образом, для неустойчивых систем процессы необратимы и на микро- и на макроскопическом уровне. Необратимость не зависит от возможностей наблюдателя. В устойчивых системах при устойчивых траекториях частиц процессы были бы обратимы как на микро-, так и на макроуровне.

При описании неустойчивых систем вероятность приобретает объективный смысл. «Субъективная интерпретация соответствует случаю, когда отдельные траектории неизвестны. Вероятность (и в конечном счете связанная с ней необратимость) при таком подходе имеет своим истоком наше незнание. К счастью, существует другая, объективная интерпретация: вероятность возникает в результате альтернативного описания, возможного лишь для сильно неустойчивых динамических систем.

При таком подходе вероятность становится объективным свойством, порождаемым, так сказать, внутри динамики и отражающим фундаментальную структуру динамической системы» [5, 343]. Т.е. необратимость не вызвана какими-либо приближениями, которые добавляются к фундаментальным законам.

Кроме того, необратимые процессы в неравновесных нелинейных системах могут быть конструктивными. Если в равновесной термодинамике необратимые процессы (диффузия, вязкость и т.п.) приводили систему в равновесие, то в ситуации далекой от равновесия они могут вызывать появление когерентности, появление упорядоченных структур-процессов. Например, термодиффузия, ячейки Бенара, генерация лазерного излучения. Необратимый поток тепла через смесь газов при термодиффузии приводит к разделению смеси, т.е. к упорядочению. Концентрация одной компоненты становится выше у горячей стенки сосуда, концентрация другой – у холодной.

Ячейки Бенара можно наблюдать в слое жидкости, налитой в плоский сосуд. Жидкость подогревают снизу. Пока разность температур верхнего и нижнего слоя меньше некоторого значения, определенного для данной системы, механизм передачи тепла — теплопроводность. При увеличении разности температур внезапно, при некотором критическом значении ΔT_k , поведение жидкости резко меняется. Возникает структура в виде совокупности шестиугольных конвективных образований, структур-процессов, которые называются ячейками Бенара. Структуры возникают после того как однородное состояние жидкости становится неустойчивым. Причина потери устойчивости: вследствие теплового расширения плотность жидкости в нижних слоях становится меньше, чем в верхних, а сила тяжести направлена сверху вниз. Если у нижней поверхности капелька жидкости немного сместится вверх, она попадет в более холодный слой с большей плотностью. Поэтому Архимедова выталкивающая сила увеличится, она будет больше веса капли. Начнется восходящее движение. От верхней поверхности по аналогичной причине начнется движение нисходящее. Возникают нисходящие и восходящие самосогласованные потоки. По сравнению с однородным равновесным состоянием это — более высокоорганизованная структура. Отдельная конвективная ячейка содержит не менее 10^{20} молекул, которые движутся согласованно, когерентно, несмотря на хаотичное тепловое движение.

Таким образом, в природе существует два вида необратимых процессов:

- разрушение структур вблизи состояния равновесия;
- возникновение структур вдали от положения равновесия в открытых нелинейных системах.

Значит, стрелу времени нельзя ассоциировать только с увеличением беспорядка и переходом в равновесие. При определенных условиях она обеспечивает возможность спонтанного возникновения упорядоченных структур-процессов, переход в качественно новое состояние.

Выводы

Для снятия противоречия между фундаментальными законами физики и необратимостью природных процессов в учебные курсы следует ввести понятие неустойчивости динамических систем. По мнению Д.С. Чернавского это понятие будет одним из основных в науке XXI века. Кроме того, для современного мировоззрения важным является представление о том, что в открытых системах или их частях идут как необратимые процессы установления равновесия, так и необратимая самоорганизация с усложнением структур. «Для полного понимания необратимости следует учитывать сразу оба процесса: самоорганизацию с небольшим уменьшением энтропии и дегградацию порядка с термализацией энергии и рождением энтропии в гораздо более мощном темпе. Полное понимание необратимости невозможно без понимания как разрушения, так и упорядочения» [6, 467].

Литература

1. *Гинзбург В.Л.* Физический минимум — какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века / Специальное заседание редакционной коллегии журнала «Успехи физических наук», приуроченное к 90-летию со дня рождения В.Л. Гинзбурга / В.Л. Гинзбург // УФН. — 2007. — Т. 177, № 4 — с. 348.
2. *Пригожин И.* Время, структура и флуктуации (Нобелевская лекция) / И. Пригожин // УФН. — 1980. — Т. 131.
3. *Пригожин И.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, В. Кондепуди; пер с англ. Ю.А. Данилова, В.В. Белого. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
4. *Пригожин И.* Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы / И.Р. Пригожин. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». — 2000. — 208 с.
5. *Пригожин И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И.Р. Пригожин, И. Стенгерс. — М.: Прогресс, 1986. — 432 с.
6. *Кадомцев Б.Б.* Динамика и информация / Б.Б. Кадомцев // УФН. — 1994 — Т. 164, № 5 — С. 449–530.