# Лекция 1. Природа классической физики

Где-то посреди стейнбековского пейзажа двое усталых путников присаживаются на обочине дороги. Ленни, почесывая бороду произносит: «Расскажи мне о законах физики, Джордж». Джордж мгновение смотрит в землю, потом бросает на Ленни взгляд поверх очков. «Ну, хорошо, Ленни, но только самый минимум».

## Что такое классическая физика?

Термин *классическая физика* относится к той физике, которая существовала до появления квантовой механики. Классическая физика включает ньютоновские законы движения частиц, теорию электромагнитного поля Максвелла—Фарадея и общую теорию относительности Эйнштейна. Но это нечто большее, чем просто конкретные теории конкретных явлений; это ряд принципов и правил — базовая логика, подчиняющая себе все явления, для которых несущественна квантовая неопределенность. Этот свод общих правил называется *классической механикой*.

Задача классической механики состоит в предсказании будущего. Великий физик восемнадцатого века Пьер-Симон Лаплас выразил это в знаменитой цитате:

> Состояние Вселенной в данный момент можно рассматривать как следствие ее прошлого и как причину ее будущего. Мыслящее существо, которое в определенный момент знало бы все движущие силы природы и все положения всех объектов, из которых состоит мир, могло бы — если бы его разум был достаточно обширен для того, чтобы проанализировать все эти данные,— выразить одним уравнением движение и самых больших тел во Вселенной, и мельчайших атомов; для такого интеллекта не осталось бы никакой неопределенности и будущее открылось бы перед его взором точно так же, как и прошлое.

В классической физике, если вы знаете все о состоянии системы в некоторый определенный момент времени, а также знаете уравнения, определяющие изменения, происходящие в системе, вы можете предсказать будущее. Именно это мы имеем в виду, говоря, что классические законы физики *детерминистичны*.

Если это верно даже в том случае, когда прошлое и будущее меняются местами, то те же уравнения позволяют узнать все и о прошлом. Такие системы называются *обратимыми*.

## Простые динамические системы и пространство состояний

Совокупность объектов (частиц, полей, волн — чего угодно) называется *системой*. Систему, представляющую собой всю Вселенную или настолько изолированную от всего остального, что она ведет себя так, будто ничего больше не существует, называют *замкнутой*.

**УПРАЖНЕНИЕ 1**

Поскольку это понятие крайне важно для теоретической физики, подумайте о том, что же такое замкнутая система, порассуждайте, существует ли она в действительности. Какие допущения неявно делаются в отношении замкнутой системы? Что такое открытая система?

Чтобы почувствовать, что такое детерминистичность и обратимость, мы начнем с очень простого примера замкнутых систем. Они значительно проще тех вещей, которые мы обычно изучаем в физике, но они подчиняются правилам, которые являются предельно упрощенным вариантом классической механики. Представьте себе абстрактный объект, имеющий лишь одно состояние. Можно, например, представить монету, приклеенную к столу, которая всегда показывает свой аверс. На жаргоне физиков совокупность всех состояний, занимаемых системой, называется *пространством состояний*. Это не обычное пространство; это математическое множество, элементы которого соответствуют возможным состояниям системы. В нашем случае пространство состояний содержит лишь одну точку, а именно Аверс (или просто А), поскольку система имеет лишь одно состояние. Предсказать будущее такой системы чрезвычайно просто: с ней никогда ничего не происходит, и результатом любого наблюдения всегда будет А.

Следующая по простоте система имеет пространство состояний, содержащее две точки; в этом случае у нас имеется один абстрактный объект и два возможных состояния. Можете представлять себе монету, выпадающую либо Аверсом, либо Реверсом (А или Р) — рис. 1.


**Рис. 1.** *Пространство двух состояний*

В классической механике считается, что системы изменяются плавно, без прыжков или перерывов. Такое поведение называют *непрерывным*. Очевидно, что из состояния Аверс нельзя непрерывно перейти в состояние Реверс. Движение в данном случае неизбежно происходит дискретными скачками. Так что давайте предположим, что время тоже идет дискретными шагами, которые нумеруются целыми числами. Мир с такой дискретной эволюцией можно назвать *стробоскопическим*.

Система, которая с ходом времени изменяется, называется *динамической*. Динамическая система — это не только пространство состояний. Она также включает *закон движения*, или *динамический закон*. Это правило, которое говорит, какое состояние станет следующим после текущего.

Один из простейших динамических законов состоит в том, что состояние в следующий момент будет таким же, как сейчас. Тогда в нашем примере возможны две истории: А А А А А А... и Р Р Р Р Р Р...

Другой динамический закон диктует, что каким бы ни было текущее состояние, следующее за ним будет противоположным. Можно нарисовать диаграммы, иллюстрирующие эти два закона. На рис. 2 показан первый закон, когда А всегда переходит в А и стрелка от Р идет к Р. И вновь будущее очень легко предсказать: если начать с А, система останется в состоянии А; если начать с Р, система останется в Р.

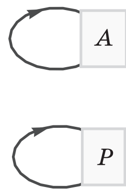

**Рис. 2.** *Динамический закон для системы с двумя состояниями*

Диаграмма для второго возможного закона представлена на рис. 3, где стрелки идут от A к P и от P к A. Будущее по-прежнему можно предсказывать. Например, если начать с A, то история будет: A P A P A P A P A P... Если же начать с P, получится история: P A P A P A P A...

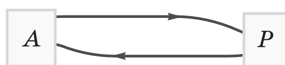


**Рис. 3.** *Другой динамический закон для системы с двумя состояниями*

Можно также записать эти динамические законы в виде формул. Переменные, описывающие систему, называются *степенями свободы*. У нашей монеты одна степень свободы, которую можно обозначить греческой буквой сигма: $\sigma$. Сигма имеет только два возможных значения: $\sigma = 1$ и $\sigma = -1$ соответственно для A и P. Нам также нужен символ для обозначения времени. Когда рассматривается непрерывное течение времени, его принято обозначать $t$. Но у нас эволюция дискретна, и мы будем использовать $n$. Состояние в момент $n$ обозначается выражением $\sigma(n)$, то есть значение $\sigma$ в момент $n$.

Параметр $n$ последовательно принимает значения всех натуральных чисел, начиная с 1.

Запишем уравнения эволюции для двух рассматриваемых законов. Первый из них гласит, что никаких изменений не происходит. Его уравнение —

$$\sigma(n + 1) = \sigma(n).$$

Другими словами, каким бы ни было значение $\sigma$ на $n$-м шаге, то же значение будет и на следующем шаге.

Второе уравнение эволюции имеет вид

$$\sigma(n + 1) = -\sigma(n),$$

что означает перемену состояния на каждом шаге.

Поскольку в обоих случаях будущее поведение полностью детерминировано начальным состоянием, такие законы называются детерминистическими. Все фундаментальные законы классической механики — детерминистические.

Давайте ради интереса обобщим систему, увеличив число состояний. Вместо монеты можно использовать шестигранную игральную кость, имеющую шесть возможных состояний (рис. 4).

Теперь число возможных законов значительно возрастает и их становится нелегко описать словами и даже формулами. Проще всего рассмотреть диаграмму вроде приведенной на рис. 5. Из нее видно, что номер состояния, заданный в момент $n$, увеличивается на единицу в следующий момент $n + 1$. Это работает, пока мы не дойдем до состояния 6, где диаграмма предписывает вернуться в состояние 1 и повторить процесс. Такая бесконечно повторяющаяся схема называется *циклом*. Например, если начать с состояния 3, то история будет иметь вид: 3, 4, 5, 6, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 1, 2, ... Назовем эту схему динамическим законом 1.

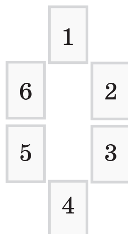


**Рис. 4.** *Система с шестью состояниями*

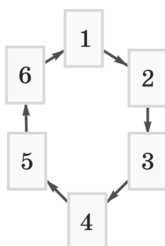


**Рис. 5.** *Динамический закон 1*

На рис. 6 показан другой закон — динамический закон 2. Он выглядит несколько более запутанным, но логически он идентичен предыдущему: в обоих случаях система бесконечно обходит в цикле все шесть возможных состояний. Если переименовать состояния, то динамический закон 2 станет точно таким же, как динамический закон 1.

Но не все законы логически эквивалентны. Рассмотрим, например, закон, показанный на рис. 7. Этот динамический закон 3 имеет два цикла. Если начать двигаться в одном из них, то невозможно попасть в другой. Тем не менее этот закон совершенно детерминистичен. С какого бы состояния вы ни начали, будущее остается предопределенным. Например, если начать с состояния 2, получится история: 2, 6, 1, 2, 6, 1, ... и состояние 5 никогда не будет достигнуто. Если же начать с состояния 5, то история будет иметь вид: 5, 3, 4, 5, 3, 4, ... и недостижимым окажется состояние 6.

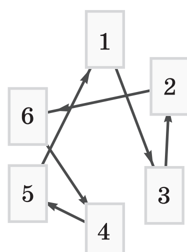


**Рис. 6.** *Динамический закон 2*

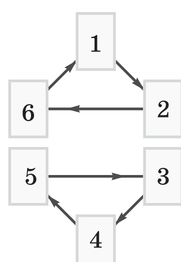


**Рис. 7.** *Динамический закон 3*

На рис. 8 показан динамический закон 4 с тремя циклами.

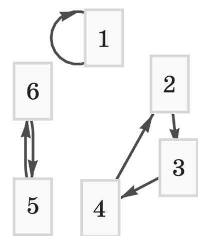


**Рис. 8.** *Динамический закон 4*

Понадобилось бы много времени, чтобы нарисовать все возможные динамические законы в системе с шестью состояниями.

**УПРАЖНЕНИЕ 2**

Сможете ли вы найти общий способ классификации законов, которые возможны в системе с шестью состояниями?

## Правила, которые не разрешены: минус первый закон

Согласно правилам классической физики не все законы допустимы. Для динамического закона недостаточно быть детерминистичным; он еще должен быть обратимым.