

# СОДЕРЖАНИЕ

На какие вопросы отвечает эта книга .....	4
Предисловие.....	6
<b>Глава I.</b> Движение и система отсчета .....	8
<b>Глава II.</b> Свет и пределы классической механики .....	17
<b>Глава III.</b> Основания специальной теории относительности .....	30
<b>Глава IV.</b> Следствия специальной теории относительности .....	46
<b>Глава V.</b> Почему ускорение и гравитация могут оказаться одним и тем же .....	62
<b>Глава VI.</b> Общая теория относительности: как масса искривляет пространство и время.....	79
<b>Глава VII.</b> Парадоксы и границы теории относительности.....	98
<b>Глава VIII.</b> Вселенная в свете теории относительности .....	111
Литература .....	126

# НА КАКИЕ ВОПРОСЫ ОТВЕЧАЕТ ЭТА КНИГА

## **ПОЧЕМУ О ДВИЖЕНИИ НЕЛЬЗЯ ГОВОРИТЬ БЕЗ УКАЗАНИЯ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА?**

Любое движение имеет смысл только относительно выбранной системы отсчета. Один и тот же объект может казаться неподвижным в одной системе и движущимся в другой. Именно это наблюдение лежит в основе физического понимания движения. *Глава 1*

## **ПОЧЕМУ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТА ПОСТАВИЛИ ПОД СОМНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКУЮ МЕХАНИКУ?**

Точные эксперименты конца XIX века показали, что скорость света не зависит от движения источника или наблюдателя. Такой результат противоречил представлениям классической механики и заставил физиков пересмотреть привычные взгляды на пространство и время. *Глава 2*

## **ПОЧЕМУ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ НАЧИНАЕТСЯ ВСЕГО С ДВУХ ПРИНЦИПОВ?**

Альберт Эйнштейн сформулировал два постулата: равноправие инерциальных систем отсчета и постоянство скорости света. Из этих простых утверждений вытекает новое понимание времени, расстояния и одновременности. *Глава 3*

## **ПОЧЕМУ ВРЕМЯ МОЖЕТ ИДТИ ПО-РАЗНОМУ ДЛЯ РАЗНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ?**

При больших скоростях измерения времени и длины зависят от движения системы отсчета. Эти эффекты становятся заметными лишь при скоростях, близких к скорости света, однако они подтверждены многочисленными экспериментами. *Глава 4*

## **ПОЧЕМУ ГРАВИТАЦИЯ СВЯЗАНА С УСКОРЕНИЕМ?**

Принцип эквивалентности показывает, что действие гравитации во многих ситуациях неотличимо от действия ускорения. Эта идея стала отправной точкой для новой теории тяготения. *Глава 5*

## **ПОЧЕМУ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГРАВИТАЦИЯ ПЕРЕСТАЕТ БЫТЬ СИЛОЙ?**

Масса и энергия изменяют геометрию пространства-времени. Движение тел определяется этой геометрией и происходит по ее законам, а не под действием силы в привычном смысле. *Глава 6*

## **ПОЧЕМУ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ПРИВОДИТ К ПАРАДОКСАМ?**

Новые представления о времени и движении противоречат интуиции. Мысленные эксперименты, например парадокс близнецов, помогают понять, как работают законы релятивистской физики. *Глава 7*

## **ПОЧЕМУ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ВАЖНА ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ВСЕЛЕННОЙ?**

Уравнения Эйнштейна позволяют описывать структуру и эволюцию космоса. На их основе построена современная космология, объясняющая расширение Вселенной и ее развитие. *Глава 8*

Появление теории относительности стало результатом не только теоретических размышлений, но и множества точных экспериментов, таких как измерения скорости света. Эти данные разошлись с классическими представлениями ньютоновской механики и стали основой для построения новых физических теорий

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Теория относительности — одно из самых известных научных достижений XX века. Даже люди, далекие от физики, слышали о том, что при больших скоростях время может идти иначе, что масса связана с энергией, а пространство и время образуют единую структуру. За этими, казалось бы, простыми формулировками стоит глубокое изменение представлений о мире, произошедшее по историческим меркам сравнительно недавно.

На протяжении нескольких столетий основой физической картины мира оставалась механика Ньютона. Она успешно объясняла движение планет, падение тел и работу машин. В рамках этой картины пространство рассматривалось как неизменная система координат, в которой происходят все события, а время считалось одинаковым для всех наблюдателей. Такая система представлений оказалась чрезвычайно успешной и долгое время виделась окончательной.

Однако в конце XIX века физика столкнулась с рядом трудностей. Исследования электричества и магнетизма, а также точные измерения скорости света показали, что привычные представления о пространстве и времени требуют пересмотра. Постепенно стало ясно, что для описания природы на более глубоком уровне необходима новая теория.

Эта теория была создана Альбертом Эйнштейном в начале XX века. В специальной теории относительности он показал, что измерения времени и расстояний зависят от движения наблюдателя. Позднее общая теория относительности дала новое объяснение гравитации: она рассматривается как проявление геометрических свойств пространства-времени.

С тех пор теория относительности стала одной из основ современной физики. Ее предсказания подтверждаются экспериментами и наблюдениями — от лабораторных исследований элементарных частиц до изучения далеких галактик и черных дыр. Некоторые эффекты теории относительности учитываются в повседневных технологиях: например, при работе спутниковых навигационных систем.

Эта книга посвящена основным идеям теории относительности. Мы последовательно рассмотрим, как возникли новые представления о пространстве и времени, какие эксперименты привели к пересмотру прежних взглядов и какие последствия имеют эти идеи для понимания устройства Вселенной. Цель книги — показать, что за сложными формулами скрывается логичная и удивительно стройная картина природы.

## **ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В КУЛЬТУРЕ**

Теория относительности Эйнштейна оказала глубокое влияние не только на науку, но и на культуру. Концепции, такие как искривление пространства и времени, стали популярными в литературе, кино и других видах искусства, отражая радикальные изменения в восприятии Вселенной

# ДВИЖЕНИЕ И СИСТЕМА ОТСЧЕТА

*Природа говорит языком движения,  
и понять его можно лишь через сравнение.*

Галилео Галилей,  
физик и астроном, Италия

Движение кажется непосредственным свойством тел, но попытка точно определить скорость приводит к вопросу, относительно чего она измеряется. Из этого исходного наблюдения постепенно возникает представление о системах отсчета, инерциальном движении и законах, одинаковых для разных наблюдателей.

## ДВИЖЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ В КОСМОСЕ

По измерениям реликтового излучения, Солнечная система движется со скоростью около 370 км/с относительно космического микроволнового фона. Это излучение возникло примерно через 380 тысяч лет после Большого взрыва и сегодня заполняет всю наблюдаемую Вселенную

## ЧТО ОЗНАЧАЕТ СЛОВО «ОТНОСИТЕЛЬНО»

В физике слово «относительно» имеет вполне определенный смысл. Любое утверждение о движении требует указания системы отсчета. Пока не сказано, относительно чего производится измерение, численные значения остаются неопределенными. Скорость, направление и длительность процесса приобретают смысл только после того, как выбраны тело отсчета и способ измерения.

Говоря, что поезд движется со скоростью шестьдесят километров в час, обычно подразумевают скорость относительно земли. Земля, рельсы и станция принимаются за систему отсчета, связанную с неподвижным телом, поэтому уточнение часто не произносится. Однако пассажир внутри вагона может принять за тело отсчета любую вещь в вагоне, а то и сам вагон. В этом

случае поезд будет находиться в покое, а движущимися окажутся окружающие предметы.

Здесь нет противоречия. Один и тот же процесс описывается исходя из двух разных систем отсчета. В повседневной речи глагол «движется» звучит так, словно движение является внутренним свойством тела. Мы говорим: «поезд движется», «автомобиль едет», «самолет летит». Однако в физике движение всегда определяется сравнением. Положение тела изменяется относительно других объектов, выбранных за тело отсчета. Если сменить систему отсчета, изменятся координаты и скорость.

Хороший пример — сама Земля. С точки зрения человека на поверхности планета кажется неподвижной. Мы воспринимаем ее как естественную основу для всех измерений. Однако с астрономической точки зрения Земля движется вокруг Солнца со скоростью около тридцати километров в секунду. Вместе с Солнцем она участвует в движении вокруг центра нашей Галактики, а сам Млечный Путь движется относительно других галактик. Таким образом, одно и то же тело может одновременно участвовать во множестве движений. Все зависит от того, относительно чего мы производим расчеты.

Это не означает, что измерения становятся произвольными. Напротив, результаты, полученные в разных системах отсчета, связаны между собой

Земля движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с, а Солнце обращается вокруг центра Млечного Пути со скоростью примерно 220 км/с. Один оборот Солнца вокруг Галактики занимает около 230 миллионов лет

В астрономии используется небесная система координат — проекция земных координат на воображаемую небесную сферу. Положение звезд в ней задают двумя углами: прямым восхождением и склонением, аналогами долготы и широты

строгими правилами пересчета, которые позволяют физике описывать движение последовательно и точно.

## **СИСТЕМА ОТСЧЕТА КАК СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ**

Чтобы описать любое движение, необходимо выбрать систему отсчета. В физике этим понятием обозначают совокупность правил, с помощью которых измеряются положение и время. Прежде всего нужно задать тело отсчета и связать с ним систему координат. Тело отсчета — точка, от которой будут измеряться расстояния. Затем выбираются направления осей, определяющие ориентацию пространства. Наконец, требуется способ измерения времени — часы, которые позволяют фиксировать момент события. При такой комбинации любое событие можно описать четырьмя величинами: тремя пространственными координатами и моментом времени.

Понять роль системы отсчета легче всего на простом примере. Представим пассажира, который подбрасывает мяч вертикально вверх в движущемся поезде. В его системе отсчета мяч поднимается и опускается почти по прямой линии и возвращается в руки. Наблюдатель на платформе видит другое. Для него мяч одновременно движется вперед вместе с поездом и вверх-вниз, поэтому его траектория имеет форму дуги.

Оба наблюдателя описывают один и тот же бросок. Различие возникает из-за того, что они используют разные системы отсчета. Ни один из них не ошибается — они просто применяют разные способы измерения. Похожая ситуация возникает и в других случаях. Человек идет по салону автобуса со скоростью один метр в секунду относительно пола. Но относительно дороги его скорость больше, поскольку к его движению добавляется движение автобуса.

Или вот такая ситуация. Два корабля плывут по морю параллельными курсами и с одинаковой скоростью. Пассажиру одного корабля может показаться, что второй неподвижен. Если оба судна движутся равномерно, различить их движение довольно трудно. Только когда один из кораблей начнет ускоряться или изменит направление, различие станет заметным.

Эти примеры показывают, что описание движения всегда связано с выбранной системой отсчета.

## **РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ И ЕГО НЕВЫДЕЛЕННОСТЬ**

Особое место в физике занимает равномерное движение. Если система отсчета движется прямолинейно и без изменения скорости, обнаружить его с помощью экспериментов внутри системы невозможно.

Современные спутниковые системы навигации определяют координаты по сигналам нескольких спутников. Положение вычисляется по времени прохождения радиосигналов, поэтому точность навигации напрямую зависит от точности часов

### КАК ГАЛИЛЕЙ СФОРМУЛИРОВАЛ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Идея равноправия равномерных движений была подробно изложена Галилео Галилеем в книге «Диалог о двух главнейших системах мира» (1632). В ней описан мысленный эксперимент с каютой корабля, ставший одним из классических примеров научного рассуждения

Эта идея была ясно сформулирована еще Галилео Галилеем в XVII веке. Он предложил мысленный эксперимент с каютой корабля. Представим наблюдателя, находящегося внутри закрытой каюты, где плавают рыбки в аквариуме, падают капли воды и летают мухи. Если корабль движется плавно и равномерно, все эти процессы происходят так же, как и в неподвижной каюте. Никакой опыт внутри каюты не позволит определить, движется корабль или стоит на месте.

Современный аналог этого примера — вагон поезда. Если состав движется равномерно и без толчков, пассажир может подбрасывать мяч, играть в настольный теннис или наблюдать колебания маятника. Все эти процессы будут происходить точно так же, как и в неподвижной комнате. Если у пассажира нет возможности посмотреть в окно, он не сможет определить, движется поезд или стоит.

Совсем иначе ведет себя ускоренное движение. Если поезд начинает разгоняться, пассажира прижимает к спинке сиденья. При торможении его бросает вперед. При повороте возникает сила, увлекающая человека к центру поворота. Такие эффекты можно заметить даже с закрытыми глазами. Они связаны не со скоростью, а с ее изменением, поэтому ускорение можно обнаружить непосредственно, а равномерное движение — нет.

## ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Системы отсчета, движущиеся равномерно и прямолинейно, называются инерциальными. Это понятие тесно связано с первым законом Ньютона: если на тело не действуют силы или они скомпенсированы, оно сохраняет свою скорость и направление движения. То есть тело либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

Однако этот закон имеет смысл только в определенных системах отсчета. Если система отсчета ускоряется или вращается, свободное тело начинает вести себя иначе. Например, человек на вращающейся карусели ощущает, будто его отбрасывает наружу. Предмет, выпущенный из руки, движется по криволинейной траектории. Чтобы описать такие эффекты, приходится вводить дополнительные силы — так называемые силы инерции. Они не возникают из взаимодействия тел, а связаны с особенностями выбранной системы отсчета. В инерциальных системах таких эффектов нет. Если на тело не действуют силы, оно сохраняет свою скорость.

Инерциальные системы обладают важным свойством: законы механики имеют в них одинаковый вид. Невозможно с помощью одних только механических опытов определить, какая из таких систем находится в покое. Если два поезда движутся равномерно относительно друг друга, пассажиры каждого из них могут считать свой поезд неподвижным.

Понятие инерции ввел Исаак Ньютон в XVII веке. Он развил идеи Галилея и окончательно опроверг античное учение о том, что для движения необходимо постоянное воздействие силы

В XIX веке астрономы начали измерять скорости звезд по доплеровскому смещению спектральных линий. Этот метод позволяет определять движение звезд относительно Солнца и до сих пор широко используется в астрофизике

## КЛАССИЧЕСКОЕ СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Разные системы отсчета дают разные численные значения скорости, поэтому необходимо установить правила, позволяющие пересчитывать результаты измерений. В классической механике эти правила очень просты: скорости складываются или вычитаются.

Предположим, поезд движется относительно земли со скоростью шестьдесят километров в час. Человек внутри вагона идет по направлению движения состава со скоростью пять километров в час относительно поезда. Тогда его скорость относительно земли равна шестидесяти пяти километрам в час. Если он пойдет против движения поезда, получится пятьдесят пять километров в час.

Это правило кажется очевидным и полностью согласуется с повседневным опытом. Та же логика применяется и в других ситуациях. Если лодка движется по реке с определенной скоростью относительно воды, а сама вода течет относительно берега, скорости складываются. Если самолет летит по ветру или против него, его скорость относительно земли изменяется. Во всех этих случаях используется одно и то же правило.

В основе такого пересчета лежит важное предположение. Считается, что время течет одинаково во всех инерциальных системах. Часы в поезде и часы на платформе должны идти одинаково, если их движение равномерно. Поэтому в классической физике предполагается,