



## ВСЕЛЕННАЯ В КРУПНОМ МАСШТАБЕ

1	Специальная теория относительности	19
2	Пространство-время	29
3	Гравитация по Ньютону	37
4	Самая удачная мысль Эйнштейна	45
5	Общая теория относительности	51
6	Гравитационные волны	63
7	История Вселенной	71
8	Черные дыры	79

## НА КАРТИНКАХ

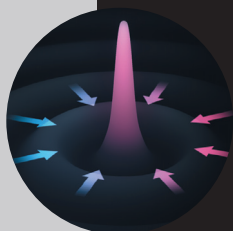
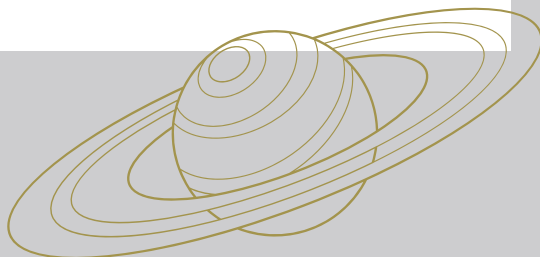
### ВСЕЛЕННАЯ В КРУПНОМ МАСШТАБЕ

Как визуализировать общую теорию относительности?	58-61
Другие следствия общей теории относительности	68-69
История Вселенной	76-77
Как выглядит черная дыра?	84-89
Что происходит в черной дыре?	86-87



## КВАНТОВЫЙ МИР

9	Стандартная модель	91
10	Суперпозиции и вероятности	99
11	Проблема измерения	111
12	Ряд квантовых странностей	121
13	Квантовые поля	131
14	Квантовые взаимодействия	139

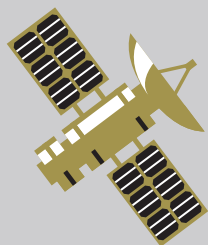


### НА КАРТИНКАХ КВАНТОВЫЙ МИР

Стандартная модель частиц	96-97
Различные интерпретации	118-119
Применение на практике	128-129
Четыре вида взаимодействий во Вселенной	146-147

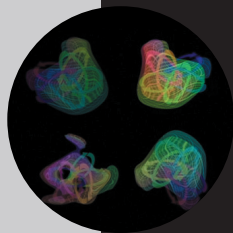
## НА ПУТИ К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ?

15	Симметрии, универсальная формальная система	151
16	Суперсимметрия	161
17	Квантовые черные дыры	167
18	Теория струн и другие подходы	173
	Заключение	185
	Благодарности	187



## НА КАРТИНКАХ НА ПУТИ К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ?

Симметрии-пространства времени	158
Симметрии квантовых полей	159
Мир струн	178-179
Петлевая квантовая гравитация	180-181
Другие подходы к квантовой гравитации	182-183



# Введение



## ВЕЛИКИЕ ЗАКОНЫ ВСЕЛЕННОЙ: ОТ ГРАВИТАЦИИ ДО КВАНТОВЫХ ЧАСТИЦ

Какое амбициозное название для своей первой книги! Прежде чем вы приступите к чтению, я бы хотел сказать несколько слов о том, почему я вообще взялся за ее создание.

Меня, как и многих других, с юных лет пленила популярная наука. На мое поколение оказали влияние самые разнообразные источники информации, будь то детская литература или телевидение. Достаточно вспомнить «Жил-был человек», «Прогулки с динозаврами» и, конечно же, непревзойденную передачу «Занимательно обо всем».

Я рос в творческой семье, поэтому с самого раннего возраста у меня был доступ к соответствующему оборудованию: музыкальным инструментам, компьютеру, программам для работы с изображениями и видео. Мой дедушка преподавал естественные науки в начальной школе в Италии и постоянно демонстрировал мне простые эксперименты.

В 2009 году я открыл для себя YouTube: сайт тогда еще только зарождался, но уже обладал огромным потенциалом. Я разместил там несколько крайне скромных видеороликов и даже не представлял, что вскоре эта платформа изменит мою жизнь.

Пока я учился в старших классах, в кинематографе на первый план вышли физика и математика: появились фильмы «Гравитация», «Интерстеллар», «Игра в имитацию» и «Вселенная Стивена Хокинга». Мой интерес к науке только рос, и когда я открыл для себя книгу Хокинга «Краткая история времени», то бесповоротно увлекся фундаментальной физикой.

Однако физика за партой была куда менее привлекательной. Однажды на уроке я так и не понял, что такое эффект Доплера, а потом наткнулся на видео, где это явление объяснялось в картинках. Наконец-то все стало ясно! В тот самый момент я осознал силу изображений: простая

До конца XIX века время и пространство считались абсолютными. Пространство воспринималось как огромная неподвижная сетка, а время — как нечто вроде универсальных космических часов, которые идут с одинаковой скоростью для всех. Но в 1908 году немецкий математик Герман Минковский, учитель Альберта Эйнштейна, оспорил такой взгляд на мир.

Минковский предположил, что пространство и время нельзя считать независимыми. Они составляют две грани единого целого, некоего гигантского блока, который содержит как все точки пространства, так и каждое мгновение времени: перед нами так называемое пространство-время. Значит, время оказывается таким же измерением во Вселенной, как и три пространственных. В пространстве-времени можно двигаться вверх и вниз, влево и вправо, вперед и назад, а также из прошлого в будущее! Иначе говоря, время — это четвертое измерение Вселенной. Когда вы смотрите на то, как вращаются часовые стрелки, вы на самом деле наблюдаете за своим движением в пространстве-времени: само время не идет, но вы проходите сквозь него и постоянно двигаетесь в будущее через четвертое измерение.

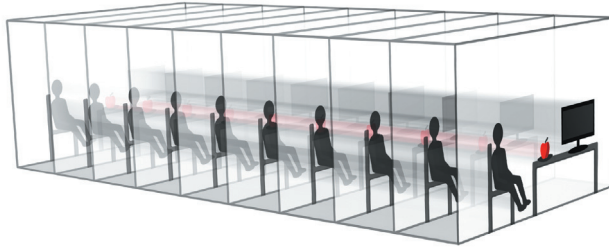


## Вселенная в форме флипбука

Взглянув на мир по-новому, мы можем представить Вселенную в виде огромного блока, через который проходят траектории движения тел — мировые линии. Ваше прошлое, настоящее и будущее сплетаются вдоль отдельно взятой мировой линии, где все мгновения вашей жизни связаны воедино. На самом деле вы постоянно находитесь в движении, даже когда сидите на диване: ваша мировая линия обращена в направлении будущего!

Весьма показательным кажется сравнение с флипбуком\*. Подобно такой книжке, картинки в которой будто бы оживают при быстром перелистывании, Вселенную тоже можно рассматривать как стопку сменяющих друг друга страниц, срезов различных моментов, среди которых переплетаются ваше прошлое, настоящее и будущее. Само собой, вы воспринимаете только одну страницу за раз, когда перемещаетесь в пространстве-времени.

\* От англ. flip (переворачивать) и book (книга). — Прим. ред.

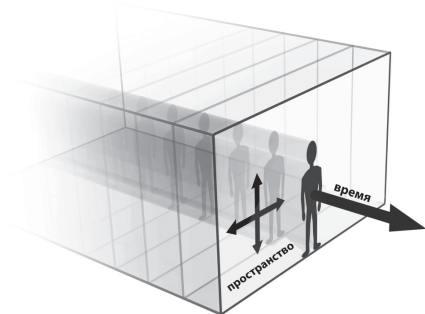


К сожалению, крайне трудно представить себе Вселенную в четырех измерениях, однако именно такое описание преобладает во всех наших современных моделях. Чтобы лучше понять сложившуюся теорию, придется пойти на хитрость: можно убрать одно измерение и вообразить Вселенную только с двумя пространственными параметрами, как в мире *Rac-Man* или любой другой двухмерной видеоигры. Так можно сформировать более ясный образ пространства-времени — блока, состоящего из всех последовательных мгновений.



## Геометрический подход к специальной теории относительности: время — это направление вашей мировой линии

Когда Эйнштейн сформулировал СТО, он понял, что пространство и время относительны. Два наблюдателя, движущиеся по-разному, будут расходиться в показаниях об измеряемых ими длинах и временных промежутках. Но как согласовать его теорию с понятием пространства-времени?



Чтобы решить поставленную задачу, нужно представить, что каждый наблюдатель (например, вы или я) обладает своими собственными осями времени и пространства. В четырехмерной Вселенной время и пространство — всего лишь направления, координаты, по которым мы измеряем применимые к нам расстояния и длины.



## Лоренцева геометрия и ее особенности

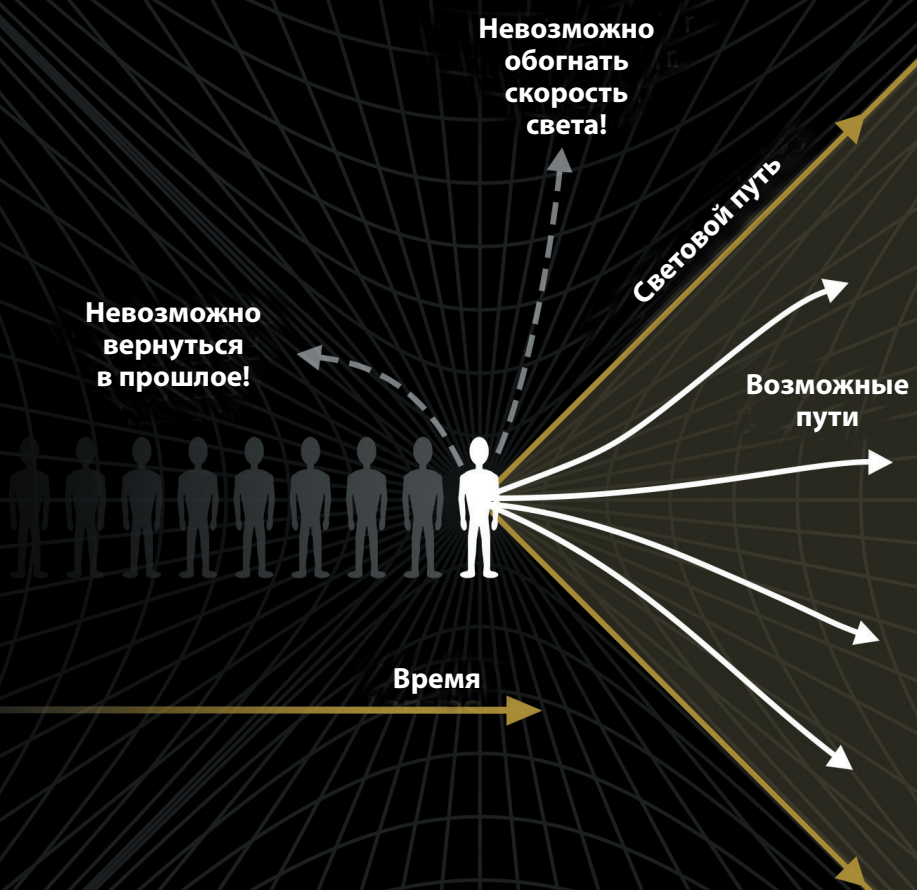
Хоть лоренцева геометрия и носит имя известного физика, в своем нынешнем виде она была формализована не самим Хендриком Лоренцем, а Германом Минковским, изобретателем концепции пространства-времени.

Минковский понял, что наша Вселенная не подчиняется законам евклидовой геометрии, а расстояния в пространстве-времени не удовлетворяют теореме Пифагора. Похоже, что они преобразуются согласно законам нового вида геометрии, так называемой метрики Минковского, в которой проводится фундаментальное различие между пространством и временем.

Лоренцева геометрия основана на довольно простом наблюдении: хотя время — это четвертое измерение, оно все же заметно отличается от трех других. Если вы встанете в достаточно большой комнате и сделаете три шага вперед, вы переместитесь в пространстве. Ничто не мешает вам развернуться и сделать три шага назад. Но попробуйте проделать то же самое во времени: пройдите вперед на три секунды в будущее, затем развернитесь и переместитесь на три секунды назад...

Если у вас получилось, законы физики пора пересмотреть! Но очевидно, что так не бывает и вернуться в прошлое невозможно. В этом и заключается принципиальная разница: в отличие от пространства, время не позволяет нам вернуться назад, мы вынуждены пересекать его из прошлого в будущее.

С помощью специальной теории относительности в 1905 году ученым наконец-то удалось сформулировать целостное представление о геометрии Вселенной с учетом постоянства скорости света. Значение СТО оказалось крайне влиятельным и революционным: нам пришлось отказаться от наивных рассуждений о понятиях пространства и времени и разработать совершенно новую геометрию, различающую эти два вида измерений. Но Эйнштейн не остановился на достигнутом... Опираясь на свое открытие, в последующие годы он попытался расширить сложившуюся парадигму и включить в нее еще одно фундаментальное явление Вселенной — свободное падение тел. Постепенно он выстроил новую, более общую теорию относительности.



# Как визуализировать общую теорию относительности?

Теория Эйнштейна уже тщательно проверена, но ее удивительные выводы порой трудно себе представить. Чтобы показать их более понятным образом, популяризаторы науки разработали несколько иллюстративных примеров.

## 1. Эластичная ткань

Такая визуализация встречается чаще всего. Вселенная представлена в виде большого полотна, на которое помещена массивная звезда. Под ее весом полотно проседает, а оказавшиеся рядом объекты закатываются внутрь, как шар в лузу.



Очень простое и интуитивно понятное изображение.

Демонстрирует, что тела притягиваются друг к другу опосредованно, через гибкое и деформирующееся пространство-время.



Создается впечатление, что звезды «накладываются» на Вселенную, хотя на самом деле они находятся внутри нее.

Феномен тяготения объясняется при помощи... тяготения! Получается, что тела закатываются в углубление именно потому, что они падают вниз?

## 2. Пространственная сетка

Во второй модели пространство представлено сеткой, изогнутой в трех измерениях. Если объект пройдет слишком близко к звезде, он отклонится и будет двигаться прямо по искривленной сетке.



Показывает космос таким, какой он есть на самом деле: перед нами трехмерный блок, охватывающий звезды.



Не объясняет, почему неподвижное тело начинает падать или почему спутники способны оставаться на орбите.

Несмотря на простоту и наглядность, первые две иллюстрации не учитывают четвертое измерение Вселенной — время. В следующих двух предпринята попытка исправить это упущение.

0

$10^{-33}$  секунд

1 микросекунда

380 000 лет

Периоды обозначены в «космическом времени»,  
отсчитываемом от первых мгновений Большого взрыва

## Планковская эпоха

В первые мгновения существования Вселенной ее плотность была настолько велика, что наши модели к ней попросту неприменимы.

## Образование протонов

Вселенная становится холоднее. Образуются первые протоны и нейтроны.

## Темные века

До появления первых звезд космос был абсолютно темным\*!

## Инфляция

За долю секунды расстояния умножаются на миллиард миллиардов миллиардов! Кратчайшие флуктуации растягиваются и ложатся в основу крупных структур.

## Первые атомы

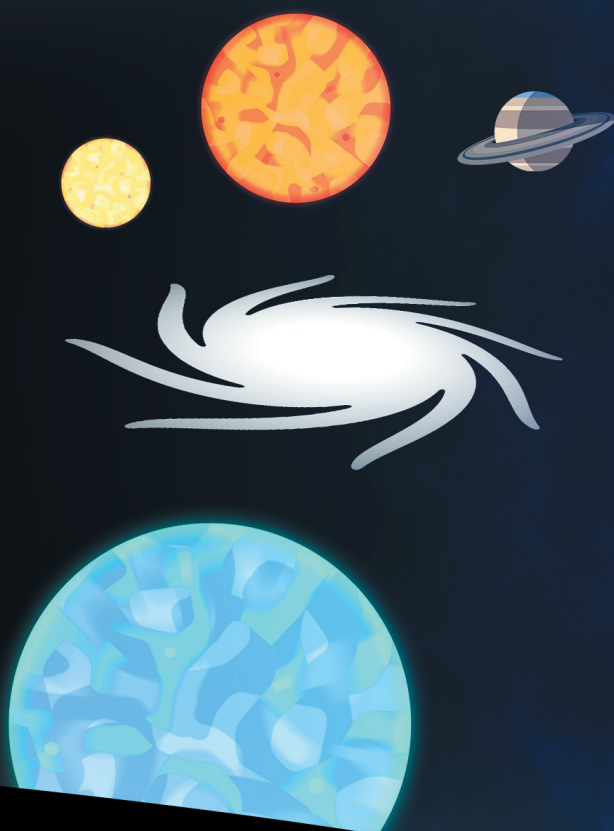
Протоны, нейтроны и электроны соединяются, образуя самые первые атомы. Вселенная становится светопрозрачной, излучается космический микроволновый фон.

\* На самом деле, было реликтовое излучение и еще некоторый свет. Но да, это некоторый промежуток, когда отсутствуют яркие источники света. — *Прим. науч. ред.*

200 млн лет   5 млрд лет   9 млрд лет   13.8 млрд лет

## Формирование Солнечной системы

## Формирование Млечного пути



Вы находитесь  
здесь!

## Первые звезды

Постепенно образуются облака газа, которые стремительно сжимаются и порождают первые звезды. Формируются галактики.

## Будущее Вселенной

Согласно общей теории относительности, Вселенная и дальше будет расширяться и охлаждаться...



ЧАСТЬ  
2

# КВАНТОВЫЙ МИР



## фермионы, частицы материи

кварки

<p><b>верхний кварк</b></p>  <p>заряд <math>2/3</math> спин <math>1/2</math> масса <math>2,2 \text{ МэВ}/c^2</math></p>	<p><b>очарованный кварк</b></p>  <p>заряд <math>2/3</math> спин <math>1/2</math> масса <math>1,3 \text{ ГэВ}/c^2</math></p>	<p><b>истинный кварк</b></p>  <p>заряд <math>2/3</math> спин <math>1/2</math> масса <math>173 \text{ ГэВ}/c^2</math></p>
<p><b>нижний кварк</b></p>  <p>заряд <math>-1/3</math> спин <math>1/2</math> масса <math>4,7 \text{ МэВ}/c^2</math></p>	<p><b>странный кварк</b></p>  <p>заряд <math>-1/3</math> спин <math>1/2</math> масса <math>96 \text{ МэВ}/c^2</math></p>	<p><b>прелестный кварк</b></p>  <p>заряд <math>-1/3</math> спин <math>1/2</math> масса <math>4,2 \text{ ГэВ}/c^2</math></p>
<p><b>электрон</b></p>  <p>заряд <math>-1</math> спин <math>1/2</math> масса <math>0,5 \text{ МэВ}/c^2</math></p>	<p><b>мюон</b></p>  <p>заряд <math>-1</math> спин <math>1/2</math> масса <math>106 \text{ МэВ}/c^2</math></p>	<p><b>тау</b></p>  <p>заряд <math>-1</math> спин <math>1/2</math> масса <math>1,8 \text{ ГэВ}/c^2</math></p>
<p><b>электронное нейтрино</b></p>  <p>заряд <math>0</math> спин <math>1/2</math> масса <math>&lt;1 \text{ эВ}/c^2</math></p>	<p><b>мюонное нейтрино</b></p>  <p>заряд <math>0</math> спин <math>1/2</math> масса <math>&lt;0,2 \text{ МэВ}/c^2</math></p>	<p><b>тау-нейтрино</b></p>  <p>заряд <math>0</math> спин <math>1/2</math> масса <math>&lt;18 \text{ МэВ}/c^2</math></p>

ЛЕПТОНЫ