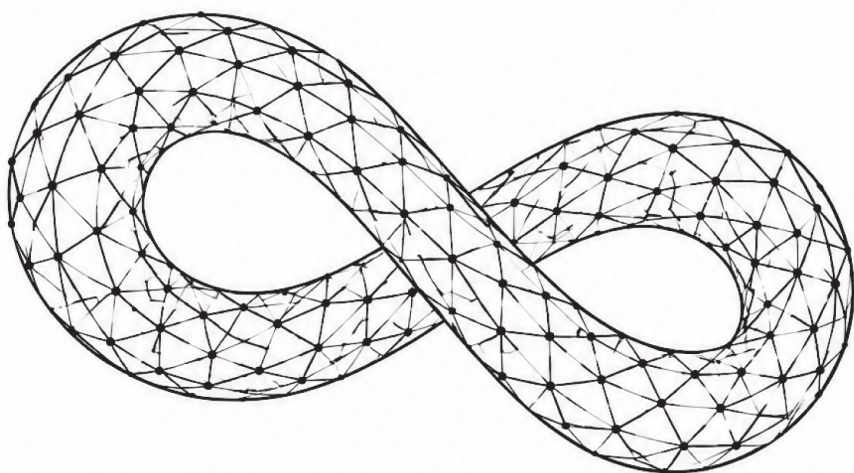


ФИЗИКА · ВЕЛИКИЕ ИМЕНА

КАРЛО РОВЕЛЛИ



ПЕТЛЯ НЕРЕАЛЬНОСТИ

Путешествие в сердце
квантовой гравитации



БОМБОРА
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Москва

УДК 530
ББК 22.31
P58

Carlo Rovelli
LA REALTÀ NON È COME CI APPARE.
LA STRUTTURA ELEMENTARE DELLE COSE

© 2014, Raffaello Cortina Editore

Научная редакция *Ольги Сажинной*, доктора физ.-мат. наук,
ведущего научного сотрудника Государственного астрономического
института им. П.К. Штернберга

Ровелли, Карло.
P58 Петля нереальности : путешествие в сердце квантовой гравитации /
Карло Ровелли ; [перевод с итальянского А. Малышевой]. — Москва :
Эксмо, 2026. — 320 с. : ил. — (Физика. Великие имена).

ISBN 978-5-04-242115-0

Откуда взялась идея, что материя состоит из мельчайших «зёрен», и как догадки древних атомистов привели к открытиям современной физики? Карло Ровелли прослеживает путь научной мысли от Милета, Демокрита и Лукреция до Эйнштейна и квантовой гравитации. Автор объясняет, почему пространство во время могут быть не непрерывной основой мира, а сетью квантовых событий.

Читатель узнает, что скрывается за понятиями квантового пространства, дискретной геометрии и «отсутствия» фундаментального времени. Размышляя о чёрных дырах, термодинамике и информации, Ровелли показывает, как физика подходит к границе привычных представлений о реальности.

Книга будет интересна тем, кто хочет разобраться в современных представлениях о Вселенной, всем, кого занимают вопросы о природе пространства, времени и реальности — школьникам и студентам, читателям без специальной подготовки.

УДК 530
ББК 22.31

ISBN 978-5-04-242115-0

© Малышева А.А., перевод на русский язык, 2026
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие. Прогулки у моря	9
--	---

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

Истоки

1. ЗЁРНА РЕАЛЬНОСТИ	17
Есть ли предел делимости?	27
Природа вещей	36
2. КЛАССИКИ	47
Исаак и маленькая луна	47
Майкл: поля и свет	60

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Истоки революции

3. АЛЬБЕРТ	75
Расширенное настоящее	77
Прекраснейшая из теорий	87
Математика или физика?	102
Космос	106
4. КВАНТЫ	123
И снова Альберт	124
Нильс, Вернер и Поль	129
Поля и частицы — это одно и то же	143

КАРЛО РОВЕЛЛИ

Кванты 1: Информация конечна	148
Кванты 2: Неопределенность	150
Кванты 3: Реальность относительна	153
Но в самом ли деле мы понимаем?	156

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

Квантовое пространство и относительное время

5. ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ ТОЖЕ КВАНТОВОЕ	166
Матвей	170
Джон	175
Первые шаги теории петлевой квантовой гравитации	181
6. КВАНТЫ ПРОСТРАНСТВА	183
Спектры объема и площади	186
Атомы пространства	193
Спиновые сети	196
7. ВРЕМЕНИ НЕ СУЩЕСТВУЕТ	201
Время вовсе не такое, каким мы его себе представляем	203
Пульс и подвесной светильник	206
Суши из пространства-времени	211
Пена спинов	214
Как устроен мир?	221

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

За гранью пространства и времени

8. ЗА ГРАНЬЮ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА	229
Маэстро	229
Квантовая космология	236

ПЕТЛЯ НЕРЕАЛЬНОСТИ

9. ЭМПИРИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА?	240
Знаки Природы	244
Окно в мир квантовой гравитации	249
10. ЖАР ЧЁРНЫХ ДЫР	254
11. КОНЕЦ БЕСКОНЕЧНОСТИ	266
12. ИНФОРМАЦИЯ	275
Тепловое время	289
Реальность и информация	294
13. ТАЙНА	300
 Библиография	 309
Комментарии.	314

ПРЕДИСЛОВИЕ. ПРОГУЛКИ У МОРЯ

Мы одержимы собой. Мы изучаем собственные историю, психологию, философию, литературу, собственных богов. Многое из познанного — это постоянное хождение человека по кругу вокруг самого себя, словно мы — самое важное во Вселенной. Наверное, потому я так люблю физику: за то, что она распахивает окно в мир, наполняя комнату свежим ветром и открывая взору вид, от которого не устаёшь изумляться.

О Вселенной мы узнали невероятно много, осознали на протяжении веков множество своих ошибок. Когда-то мы верили, что Земля плоская, что она неподвижно покоится в центре мироздания, а сама Вселенная мала и всегда остаётся неизменной. Люди полагали, что они — особая порода, не родственная другим биологическим видам. Со временем, однако, мы открыли кварки, чёрные дыры, частицы света, волны пространства и причудливые молекулярные конструкции в каждой клетке нашего тела. Человечество подобно ребёнку, который растёт и с изумлением обнаруживает, что мир — это не только его комнатка и детская площадка, но нечто огромное, где есть тысячи неизведанных вещей и идей, непохожих на те, среди которых он вырос. Вселенная многообразна

и безгранична, и мы продолжаем открывать всё новые её грани. Чем больше мы познаём мир, тем больше поражаемся его разнообразию, красоте и простоте.

И в то же время, чем больше мы открываем, тем яснее осознаём: неизвестного больше, чем уже понятого. Чем мощнее телескопы, тем более странные и неожиданные небеса мы видим. Чем глубже мы вглядываемся в мельчайшие детали материи, тем более фундаментальные структуры обнаруживаем. Сегодня мы можем восстановить картину мира почти до самого Большого взрыва — грандиозного явления, породившего 14 миллиардов лет назад все галактики на небе; но уже начинаем различать, что есть нечто и за его пределами. Мы узнали, что пространство искривляется, и уже мало-помалу понимаем, что само это пространство соткано из вибрирующих квантовых зёрен.

Наши знания об элементарной грамматике мира неуклонно растут.

Если попытаться собрать воедино всё, что мы узнали о физическом мире в XX веке, все указания ведут к чему-то глубоко отличному от представлений о материи и энергии, о пространстве и времени, которым нас учили в школе. Проступает элементарная структура мира, в которой не существует ни времени, ни пространства, рождённая множеством квантовых событий. Квантовые поля формируют пространство, время, материю и свет, обеспечивая обмен данными между событиями. Реальность — это сеть гранулированных явлений; динамика, связывающая их, вероятностна; пространство, время,

ПЕТЛЯ НЕРЕАЛЬНОСТИ

материя и энергия между ними растворяются в облаке этих вероятностей.

Этот новый и странный мир медленно проступает сегодня из изучения главной нерешённой задачи фундаментальной физики — *квантовой гравитации*. Задача эта состоит в координации того, что мы поняли о мире благодаря двум великим открытиям физики XX века — общей теории относительности и квантовой теории. Именно квантовой гравитации и тому удивительному миру, который она открывает перед нами, и посвящена эта книга.

Это живой рассказ о научном поиске: о текущих открытиях, устоявшемся знании и зарождающихся прозрениях относительно фундаментальной сути мироздания. Она берёт начало у истоков ключевых идей, помогающих сегодня сформировать стройную картину мира. В ней раскрываются два величайших прорыва XX века — общая теория относительности Эйнштейна и квантовая механика, при этом акцент сделан на самой сути их физического содержания.

В книге раскрывается образ Вселенной, который складывается при изучении квантовой гравитации, учитывая самые современные «подсказки» Природы, например, подтверждение Стандартной космологической модели космической обсерваторией «Планк» (2013) и отсутствие следов суперсимметричных частиц в ЦЕРНе (2013), ожидавшихся многими учёными. В ней также рассматриваются следствия этих идей: дискретная структура пространства, растворение времени в микромире, физика

Большого взрыва, термодинамическая природа чёрных дыр и наметившееся понимание того, какую роль в основах физики играет информация.

Вспомним знаменитый платоновский миф из Седьмой книги «Государства»: люди, прикованные цепями в глубине тёмной пещеры, видят лишь тени на стене, отбрасываемые огнём за их спинами. Они принимают эти тени за подлинную действительность. Но вот один из этих людей вырывается на свободу, покидает пещеру и впервые видит солнечный свет и безграничный мир. Сначала его ослепляет непривычная яркость, он теряется. Однако постепенно зрение привыкает, и, вернувшись к узникам, человек в восторге делится своим открытием. Но товарищам, познавшим лишь мир теней, нелегко поверить его словам.

Так и все мы находимся в глубине пещеры, скованные цепями собственного невежества и предрассудков, а наши слабые чувства показывают лишь тени. Любые попытки увидеть дальше часто смущают нас: мы не привыкли к такому; и всё же мы продолжаем идти вперед. Наука и есть такие искания. Научная мысль исследует и переосмысливает мир, предлагая всё более точные его образы: она учит мыслить эффективнее. Наука — это непрерывное исследование форм мышления. Её сила — в умении разрушать предвзятые идеи, открывать новые грани реальности и создавать новые, более совершенные образы мира. Это путешествие в неизведанное опирается на всю накопленную сумму знаний, но душа его — в переменах, в стремлении заглянуть дальше. Мир огромен и красочно

ПЕТЛЯ НЕРЕАЛЬНОСТИ

переливчат; мы хотим увидеть его, погрузиться в его тайну и красоту — ведь там, за горизонтом лежат ещё неисследованные земли. Неопределённость, в которой мы пребываем, шаткость нашего положения над бездной необъятного и неизвестного, не лишает жизнь смысла — напротив, делает её еще более ценной.

Эту книгу я написал, чтобы рассказать о том, что лично для меня является чудом и истинной целью этого приключения. Я писал её для читателя, который ничего не знает о физике, но которому любопытно открыть для себя то, что сегодня мы понимаем и чего не понимаем об элементарном устройстве мира, и в каком направлении ищем. А также — как попытку передать невероятную палитру реальности, открывающейся с этой точки зрения.

Я писал её и для коллег, сопровождавших меня в этом путешествии, разбросанных по всему миру, и для молодых энтузиастов науки, которые только собираются вступить на этот путь. Моей задачей было создать целостный образ физической реальности, преломлённый сквозь призму как теории относительности, так и квантовой механики. Это не просто популярное изложение; эта книга — попытка предложить связное видение в области, где за технической сложностью языка нередко теряется общая картина.

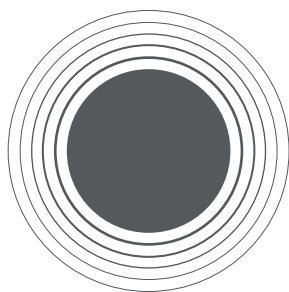
Наука создается экспериментами, гипотезами, уравнениями, вычислениями и дискуссиями, но всё это — лишь инструменты, подобные инструментам музыканта. В музыке в конечном итоге важна сама музыка, а в науке — то

КАРЛО РОВЕЛЛИ

понимание мира, которое она нам дарит. Чтобы постичь смысл открытия того, что Земля обращается вокруг Солнца, не нужно погружаться в детальные расчёты Коперника; чтобы осознать значимость идеи общего происхождения всего живого, не нужно проследживать все тонкости аргументации Дарвина. Суть науки — в умении читать великую книгу Природы, постоянно расширяя поле зрения.

В этой книге я делюсь сегодняшним видением этого поиска, моим пониманием нынешнего состояния дел, стремясь прояснить главные узлы и их взаимосвязи. Это попытка представить, как я ответил бы коллеге и другу на вопрос: «Ну а ты сам как считаешь, что происходит на самом деле?», так, словно бы между нами завязалась неспешная беседа долгим летним вечером на берегу моря.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
ИСТОКИ



Эта книга берет свое начало в Милете двадцать шесть веков назад. Но почему вдруг в работе о квантовой гравитации заходит речь о столь древних событиях, людях и идеях? Да простит меня читатель, который спешит добраться до квантов пространства, но идеи, как правило, гораздо легче понять, если проследить их от самых корней, а многие концепции, впоследствии оказавшиеся действенными для постижения мира, зародились более двух тысячелетий назад. Кратко осветив путь их возникновения, мы яснее их осмыслим, и тогда последующие шаги покажутся простыми и естественными.

Но есть и нечто большее. Некоторые проблемы, поставленные давным-давно, и по сей день не теряют своей актуальности для постижения мира, а порой даже самые современные представления о структуре пространства отсылают к понятиям и вопросам, введенным в ту далёкую эпоху. Говоря о древних идеях, я сразу же обозначаю фундаментальные вопросы, которые будут ключевыми для понимания основ квантовой гравитации. Это позволит, представляя ее, отделить ту часть идей, что восходит к истокам научной мысли (пусть они и кажутся нам подчас непривычными), от тех её аспектов, что являются радикально новыми. Мы увидим, что связь между проблемами, поставленными мыслителями древности, и решениями, найденными Эйнштейном и квантовой гравитацией, очень тесна.



ЗЁРНА РЕАЛЬНОСТИ

По преданию, в 450 году до нашей эры некий человек сел на корабль, отправлявшийся из Милета в Абдеры (рис. 1.1). Это плавание стало поворотным моментом в истории познания.

Вероятно, он бежал от политических потрясений в Милете, где знать жестокими методами возвращала себе утраченную власть. В те времена Милет процветал, будучи богатейшим городом Греции, быть может, главным в эллинском мире до золотого века Афин и Спарты. Как крупный торговый центр, он управлял сетью из почти сотни колоний и факторий, раскинувшейся от Черного моря до Египта. Сюда прибывали караваны из Месопотамии, корабли со всего Средиземноморья, а вместе с ними — новые идеи.