

# СТИВЕН ХОКИНГ

Природа  
пространства  
и времени



ОГИЗ

Издательство АСТ

# ПРИРОДА ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

В 1994 году на протяжении шести месяцев в Институте математических наук Исаака Ньютона в Кембриджском университете проходили беседы Роджера Пенроуза и Стивена Хокинга. В этой книге представлена та часть их дискуссии, которая достигла наивысшего накала. Речь идет о серьезном обсуждении некоторых наиболее фундаментальных идей о природе Вселенной. Конечно, до конца пути еще далеко — неопределенности и разногласия сохраняются до сих пор, и о них можно спорить.

Около 60 лет назад имел место знаменитый и продолжительный спор между Нильсом Бором и Альбертом Эйнштейном об основах квантовой механики. Эйнштейн отказывался признавать, что квантовая механика — это окончательная теория. Из общих философских соображений он находил ее неадекватной и поэтому вел жесткую борьбу с Бором, который представлял ортодоксальную точку зрения Копенгагенской школы (согласно копенгагенской интерпретации квантовой механики, эта наука описывает не сами микрообъекты, а только их свойства, проявляющиеся при взаимодействии с измерительными приборами; «поведение атомных объектов невозможно резко отграничить от их взаимодействия с измерительными приборами, фиксирующими условия, при которых происходит явление»). (Цит. по: Н. Бор «Дискуссии с Эйнштейном о проблемах теории познания в атомной физике. Атомная физика и человеческое позна-

ние». — *Прим. перев.*). В этом контексте спор Пенроуза с Хокингом представляется продолжением всех тех ранее высказанных аргументов: теперь Пенроуз «играет роль» Эйнштейна, а Хокинг придерживается позиции Бора. Современные проблемы усложнились и расширились, но по-прежнему представляют собой сочетание математических аргументов и философских положений. Квантовая механика (или ее более сложный вариант — квантовая теория поля) теперь глубоко развита и математически успешна, даже не смотря на существование таких скептиков, как Роджер Пенроуз. Общая теория относительности (эйнштейновская теория гравитации) в равной степени выдержала испытание временем и добилась замечательных успехов, несмотря на некоторые проблемы касательно роли сингулярностей в черных дырах.

Превалирующая нота дискуссии Хокинга и Пенроуза — возможность сочетания этих двух успешных теорий, вопрос о построении квантовой гравитации. Эта задача насыщена как идейными, так и математическими трудностями, что и является полем для аргументации обеих сторон. В числе примеров обсуждаемых фундаментальных вопросов — «стрела времени», начальные условия рождения Вселенной, поглощение информации черными дырами. По ним — и по многим другим — Хокинг и Пенроуз имеют собственные, немного отличающиеся мнения. Их доводы аккуратно иллюстрируются как математическими выкладками, так и физическими пояснениями, а формат диалога позволяет плодотворно обмениваться критикой.

Несмотря на то, что представленная информация требует математических знаний и понимания физических процессов, большинство рассуждений ведется на более высоком (или более глубоком) понятийном уровне, который заинтересует широкую аудиторию. Во всяком случае, читатель станет свидетелем масштабов и тонкостей обсуждаемых идей, проникнется труднейшей проблемой создания согласованной картины Вселенной, которая в полной мере должна учитывать и гравитацию, и квантовую теорию.

*Майкл Атья*

*Авторы, издатель и Институт математических наук  
Исаака Ньютона выражают глубокую  
признательность следующим людям, помогавшим  
в подготовке серий лекций и этой книги:*

*Мэтьюзу Р. Габердилу,  
Саймону Джиллу,  
Джонатану Б. Роджерсу,  
Дэниэлу Р. Д. Скотту  
и Полу А. Шаху*

## КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

*Стивен Хокинг*

В этих лекциях Роджер Пенроуз и я расскажем, как мы себе представляем природу пространства и времени. Наши точки зрения связаны, но во многом различны. Мы будем говорить поочередно, дав по три лекции каждый, после чего обсудим различие наших подходов. Хочу обратить внимание, что представленный материал рассчитан на подготовленных читателей, имеющих базовое понятие об общей теории относительности и о квантовой теории.

Ричард Фейнман как-то написал короткую статью о своих впечатлениях от конференции по общей теории относительности. Думаю, это была Варшавская конференция 1962 года. По его мнению, компетенция участников была крайне низка, а их работы незначительны. В большой степени благодаря работам Роджера Пенроуза, общая теория относительности вскоре приобрела гораздо более высокую репутацию (в становление общей теории относительности основной вклад внесли американские ученые Дж. Уилер и К. Торн, а также советский ученый Я. Б. Зельдович; т. н. тетрадный формализм Ньюмена — Пенроуза (1962 г.), основанный на спинорных методах и адаптированный для случая четырехмерной лоренцевой метрики, когда вместо ортонормированного базиса выбирается изотропная тетрада, эффективен для решения некоторых задач общей теории относительности, например для алгебраически специальных пространств-времен, но широкого распространения этот метод не получил. — *Прим.*

*перев.*). До этого общая теория относительности была сформулирована как беспорядочный набор уравнений в частных производных в одной координатной системе. Найдя очередное решение этих уравнений, люди бывали так рады, что не заботились об их физической интерпретации. Роджер Пенроуз ввел в рассмотрение такие современные концепции, как спиноры и глобальные методы (спиноры были введены Э. Картаном в 1913 году. — *Прим. перев.*). Он впервые показал, что можно обнаружить общие свойства решений, не получая решений непосредственно (помимо формализма Ньюмена — Пенроуза, для анализа уравнений Эйнштейна используются также методы координатного базиса и ортонормированного базиса, каждый из которых эффективен для определенного класса задач; оценки свойства решений уравнений Эйнштейна можно получить, к примеру, хорошо адаптировав или систему координат, или тетраду к свойствам пространства-времени (Р. М. Уолд «Общая теория относительности», 2008 г. — *Прим. перев.*). Его первая теорема о сингулярности познакомила меня с изучением причинной структуры (пространства-времени — *Прим. перев.*) и положила начало моей будущей работе о сингулярностях и черных дырах.

Что касается классической физики, то у нас с Роджером точка зрения одинакова. Однако наши подходы к квантовой гравитации и к собственно квантовой теории различны. Среди специалистов по физике частиц я считаю себя опасным радикалом, потому что признаю потерю квантовой когерентности, но по сравнению с Роджером я определенно консервативен. Я считаю, что физическая теория — это всего лишь математическая модель и, следовательно, бессмысленно спрашивать, соответствует ли она действительности (поэтому, видимо, такое сугобо теоретическое понятие, как «внутренняя гравитационная энтропия черной дыры», о которой речь пойдет ниже, названа Хокингом «открытием», тогда как на роль открытия могут, очевидно, претендовать только теории, многократно проверенные наблюдениями или экспериментально. — *Прим. перев.*). Единственное, что можно требовать от теории, — согласование

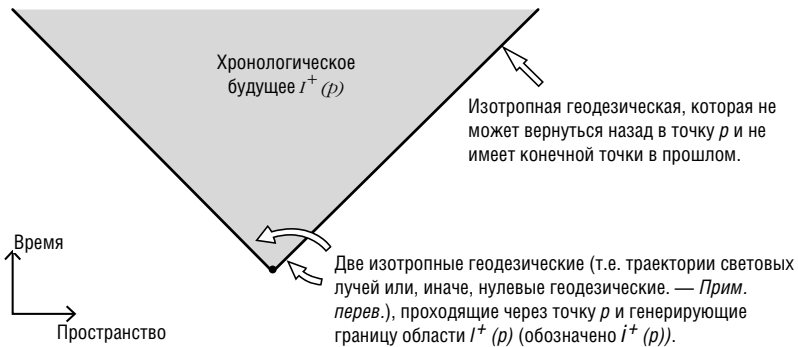
ее прогнозов с наблюдениями. Я думаю, что Роджер в глубине душе платонист, но пусть он это решит для себя сам.

Есть модели, согласно которым пространство-время обладает дискретной структурой, однако я не вижу смысла отказываться от непрерывных моделей, коль скоро они настолько успешны. Общая теория относительности — прекрасная теория, согласующаяся со всеми наблюдениями, проведенными для ее проверки. Возможно, она потребует видоизменений на планковских масштабах, но я не думаю, что это как-то повлияет на те предсказания, которые могут быть сделаны с помощью общей теории относительности. Последняя может оказаться низкоэнергетическим пределом какой-то более фундаментальной теории, подобной теории суперструн (чаще используется термин — и мы будем его придерживаться — «теория струн», хотя в общем случае следует отличать суперструны от космических струн. — *Прим. перев.*), хотя, как мне кажется, возможности теории струн переоценили. Я не хочу обсуждать теорию струн по двум причинам. Во-первых, неясно, почему комбинируя гравитацию с другими полями в теорию супергравитации, не удастся получить разумной квантовой теории. Слухи о гибели супергравитации ложны. То говорят, что она исчерпала себя, то мода меняется и все утверждают, что она страдает расходимостями, которые, правда, еще никто не нашел. Во-вторых, теория струн не дала никаких предсказаний, которые можно было бы проверить наблюдательно или экспериментально. А вот прямое применение квантовой теории к общей теории относительности — о чем я буду говорить в дальнейшем — уже дало два проверяемых предсказания. Первое — это рост малых возмущений во время периода инфляционного расширения Вселенной (что подтверждается наблюдениями анизотропии реликтового микроволнового фона). Второе предсказание — это тепловое излучение черных дыр, что, в принципе, тоже может быть проверено. Для последнего всего-то и нужно, что найти первичную черную дыру. К несчастью, поблизости их не очень много. Если бы мы нашли первичные черные дыры, то мы знали бы, как квантовать гравитацию.

Ни одно из этих предсказаний не изменится, окажись теория струн окончательной теорией всего на свете. Но теория струн — по крайней мере, на текущем этапе ее развития — совершенно не способна к каким бы то ни было предсказаниям, разве что апеллируя к общей теории относительности как к своему низкоэнергетическому пределу. Я подозреваю, что всегда так и будет, и в теории струн не окажется ничего такого, чего не предсказывала бы общая теория относительности или супергравитация. И тогда возникает естественный вопрос, насколько теория струн состоятельна как научная теория. Разве математической красоты и полноты достаточно для истинности теории при условии отсутствия характерных именно для этой теории наблюдательных предсказаний? Кроме того, теория струн в ее нынешнем состоянии не так уж красива и совсем не полна.

Одним словом, в этих лекциях я буду затрагивать только общую теорию относительности и сконцентрирую внимание на двух областях применения этой теории, где учет гравитации приводит, по всей видимости, к появлению некоторых особенностей, полностью отличающих гравитацию от других теорий поля. Итак, во-первых, наличие гравитационных сил должно приводить к тому, что пространство-время имеет начало и, возможно, конец. Вторая область — это открытие того, что можно назвать внутренней гравитационной энтропией, которая не является результатом т. н. крупнозернистой структуры пространства-времени. Некоторые ученые полагают, что эти два прогноза представляют собой всего лишь артефакты (то есть математические решения, не имеющие физического смысла, возникающие при несогласованных переходах от одной теоретической модели к другой. — *Прим. перев.*), появляющиеся в квазиклассическом приближении. Более детально, считается, что теория струн — истинная квантовая теория гравитации — «разглядит» сингулярности и определит корреляции в излучении черной дыры. Последнее же будет означать, что излучение черной дыры является тепловым только в крупнозернистом приближении. В таком случае кар-





**РИС. 1.1.** Хронологическое будущее точки  $p$ .

тинка предстала бы довольно банальной: гравитация оказалась подобной любому другому полю. Я же считаю, что гравитация должна существенно отличаться от всех других полей, потому что только гравитация формирует пространство-время, в котором сама же и оперирует. Все другие поля действуют на заданном пространственно-временном фоне. Именно это свойство гравитации приводит к тому, что время должно иметь начало. Кроме того, должны существовать такие области во Вселенной, которые никто никогда не сможет наблюдать, а это, в свою очередь, приводит к концепции гравитационной энтропии как меры наших наблюдательных возможностей.

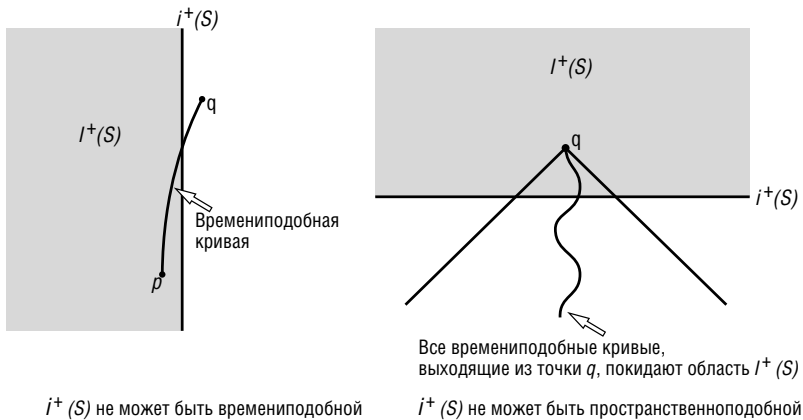
В этой — первой — лекции я сделаю обзор одной работы, в которой используются методы классической общей теории относительности. Эта работа показывает, как можно прийти к идеям, о которых я упомянул выше. Во второй и в третьей лекциях (главы 3 и 5 этой книги) я покажу, как эти идеи видоизменяются и расширяются, когда переходят в квантовую теорию. Более конкретно, во второй лекции речь пойдет о черных дырах, а в третьей — о квантовой космологии.

Изучение глобальной причинной структуры пространства-времени — один из важнейших методов исследования сингулярностей и черных дыр. Этот метод разработал Роджер Пенроуз, я тоже участвовал в этих работах. Определим  $I^+(p)$  как множество всех точек пространства-времени  $M$ , которые

могут быть достигнуты из точки  $p$  при движении по мировым линиям в направлении роста параметра времени (т. е. в будущее) (рис. 1.1.). Множество  $I^+(p)$  можно представить себе как совокупность всех возможных событий, которые зависят от события, произошедшего в точке  $p$  (таким же образом можно определить множество  $I^-(p)$  как совокупность всех возможных событий, от которых, напротив, зависит событие в точке  $p$ . — *Прим. перев.*). Можно ввести аналогичные определения, заменив плюс на минус и прошлое на будущее; я буду считать такие определения очевидными.

Определим  $I^+(S)$  как границу множества  $I^+(S)$  (здесь проводится обобщение проведенных выше рассуждений,  $I^+(S)$  — это множество хронологического будущего для множества  $S$ , которое, в свою очередь, есть совокупность всех точек  $p$ . — *Прим. перев.*). Легко видеть, что граница  $I^+(S)$  не может быть времениподобной. Действительно, в этом случае точка  $q$ , которая находится за границей  $I^+(S)$  вне области  $I^+(S)$ , оказалась бы в будущем для точки  $p$ , которая лежит внутри границы  $I^+(S)$ . Но граница  $I^+(S)$  не может быть и пространственноподобной, исключая само множество  $S$ . Действительно, каждая направленная в прошлое кривая, исходящая из точки  $q$ , которая является будущим для границы  $I^+(S)$ , будет пересекать эту границу и покидать множество будущего для  $S$ . Последнее противоречит тому факту, что точка  $q$  принадлежит будущему для  $S$ , т. е. множеству  $I^+(S)$  (рис. 1.2.).

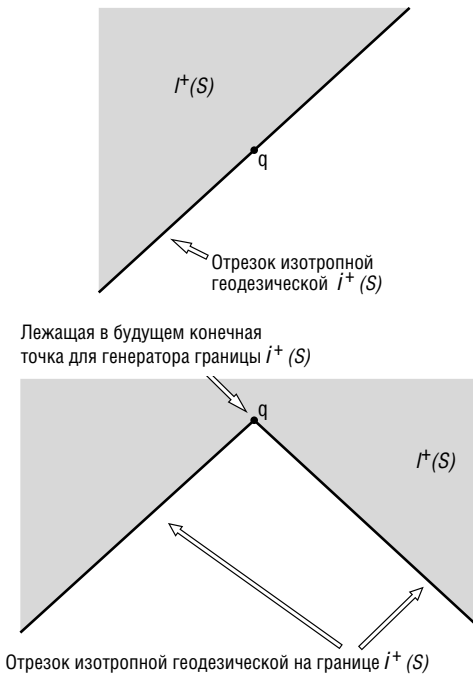
Таким образом, можно сделать вывод, что граница будущего — изотропная кривая, в отличие от самого множества  $S$ . Более точно, если точка  $q$  расположена на границе будущего, но не принадлежит замыканию множества  $S$  (т. е. не принадлежит объединению множества  $S$  с множеством его предельных точек. — *Прим. перев.*), то существует направленный в прошлое отрезок изотропной геодезической, который проходит через точку  $q$  и лежит на границе (рис. 1.3.). Может оказаться, что через точку  $q$  проходит несколько отрезков изотропных геодезических, лежащих на границе  $I^+(S)$ . Однако в этом слу-



**РИС. 1.2.** Граница хронологического будущего не может быть времениподобной или пространственноподобной (здесь  $I^+(S)$  и  $i^+(S)$  обозначены множество всех точек  $p$  и граница этого множества соответственно. — *Прим. перев.*)

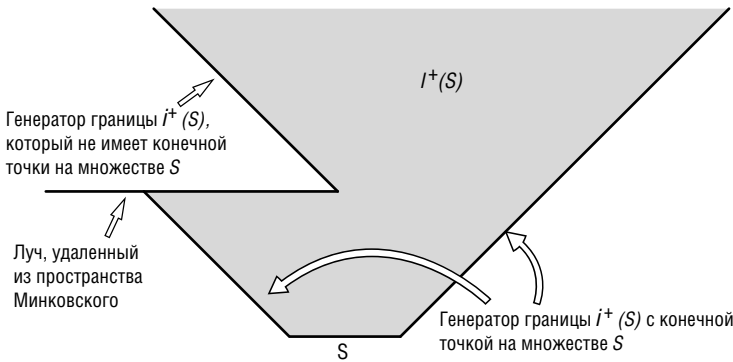
чае точка  $q$  окажется лежащей в будущем конечной точкой для этих отрезков. Другими словами, граница будущего для множества  $S$  (т. е.  $\dot{I}^+(S)$ ) порождается (генерируется. — *Прим. перев.*) изотропными геодезическими (генераторами. — *Прим. перев.*), у которых лежащая в будущем конечная точка находится на границе  $\dot{I}^+(S)$  и которые проходят во внутреннюю область будущего, если они пересекают другой аналогичный генератор. С другой стороны, генераторы границы могут иметь конечные точки в прошлом только на множестве  $S$ . Однако возможно существование таких конфигураций пространства-времени, в которых генераторы границы будущего для множества  $S$  (т. е. генераторы  $\dot{I}^+(S)$ . — *Прим. перев.*) никогда не пересекают множество  $S$ . У таких генераторов может и не оказаться конечных точек в прошлом.

Простым примером вышеописанной конструкции является пространство Минковского с удаленным горизонтальным лучом (рис. 1.4.). Если множество  $S$  расположено в прошлом относительно горизонтального луча, то этот луч будет «отбрасывать тень». В этой тени найдутся точки, расположенные в будущем для рассматриваемого луча, но не в будущем для множества  $S$ . Таким образом, существует генератор границы



**РИС. 1.3**

*Сверху:* точка  $q$  лежит на границе будущего, таким образом, существует отрезок изотропной геодезической, лежащий на границе, который проходит через точку  $q$ . *Внизу:* если существует более одного такого отрезка изотропной геодезической, то точка  $q$  будет их конечной точкой в будущем.



**РИС. 1.4**

Пространство Минковского с вырезанным лучом. Граница будущего для множества  $S$  содержит генератор, у которого нет конечной точки в прошлом.