Р. ФЕЙНМАН Р. ЛЕЙТОН М. СЭНДС

Р. ФЕЙНМАН Р. ЛЕЙТОН М. СЭНДС

ФЕЙНМАНОВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ

том 2

Излучение. Волны.
Кванты. Кинетика.
Теплота. Звук

Издательство АСТ
Москва

УДК 53
ББК 22.3
Ф36

Серия «Фейнмановские лекции по физике»

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS:
THE NEW MILLENNIUM EDITION

Печатается с разрешения издательства Basic Books,
an imprint of Perseus Books, LLC,
a subsidiary of Hachette Book Group, Inc. (США) при содействии
Агентства Александра Корженевского (Россия).

Компьютерный дизайн *В.А. Воронина*

Перевод с английского *А.В. Ефремова, Г.И. Копылова,*
Ю.А. Симонова, О.А. Хрусталева,
под редакцией *Я.А. Смородинского*

Фейнман, Ричард.

Ф36 Фейнмановские лекции по физике. Т. II (3–4) / Ричард Фейнман, Роберт Лейтон, Мэтью Сэндс; [перевод с английского]. — Москва : Издательство АСТ, 2025. — 496 с. — (Фейнмановские лекции по физике).

ISBN 978-5-17-113009-1

Американский физик Ричард Фейнман — один из величайших ученых XX века, лауреат Нобелевской премии по физике.

В свое время преподаватели Калифорнийского технологического университета задумались о том, как можно было бы перестроить курс физики, чтобы сделать его более занимательным и современным. Ричард Фейнман с энтузиазмом подхватил эту идею и согласился прочитать авторский двухгодичный курс лекций по общей физике, но только один раз. Университет, для которого это событие стало историческим, организовал запись лекций, и затем команда физиков подготовила издание в нескольких томах, которое и поныне считается одним из лучших вводных курсов по физике.

В настоящий том включены разделы «Излучение. Волны. Кванты» и «Кинетика. Теплота. Звук».

УДК 53
ББК 22.3

Глава **26**

ОПТИКА. ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ВРЕМЕНИ

§ 1. Свет

Эта глава — первая из посвященных *электромагнитному излучению*. Свет, с помощью которого мы видим, составляет только небольшую часть широкого спектра явлений одной природы, причем разные части спектра характеризуются разными значениями определенной физической величины. Эту величину называют «длиной волны». По мере того как она пробегает значения в пределах спектра видимого света, цвет световых лучей меняется от красного до фиолетового. Систематическое изучение спектра от длинных волн к коротким лучше всего начать с так называемых *радиоволн*. В технике радиоволны получают в широком диапазоне длин волн и даже более длинные, чем те, которые используются в обычном радиовещании. В радиовещании применяются волны длиной около 500 *м*, за ними идут так называемые *короткие волны*, далее радиолокационный диапазон, миллиметровый диапазон и т. д. На самом деле между разными диапазонами нет никаких границ, природа их не создала. Числа, которые соответствуют разным диапазонам, и, конечно, сами названия диапазонов весьма условны.

Далее, пройдя долгий путь через миллиметровый диапазон, мы придем к *инфракрасным* волнам, а оттуда к *спектру видимого света*. Спустившись за его границы, мы попадем в *ультрафиолетовую* область. За ультрафиолетовой областью начинаются *рентгеновские* лучи, но границу между ними точно определить мы не можем, она где-то около 10^{-8} *м*, или 10^{-2} *мк*. Это область *мягких* рентгеновских лучей, за нею идет обычное рентгеновское излучение, затем *жесткое* излучение, потом γ-излучение и так ко все меньшим значениям величины, которую мы назвали длиной волны.

В пределах обширного диапазона длин волн имеется не менее трех областей, где возможны весьма интересные приближения. Существует, например, область, где длина волны мала по сравнению с размерами приборов, с помощью которых изучают такие волны; более того, энергия фотонов, если говорить на языке квантовой механики, меньше порога чувствительности приборов. В этой области первое грубое приближение дает метод, называемый *геометрической оптикой.* С другой стороны, когда длина волны становится порядка размеров прибора (такие условия проще создать для радиоволн, чем для видимого света), а энергия фотонов по-прежнему ничтожна, применяется другое очень полезное приближение, в котором учтены волновые свойства света, но снова пренебрегается эффектами квантовой механики. Это приближение основано на *классической теории электромагнитного излучения*; оно будет обсуждаться в одной из последующих глав. Наконец, для еще более коротких длин волн, когда энергия фотонов велика по сравнению с чувствительностью приборов и от волнового характера излучения можно отвлечься, снова возникает простая картина. Такую *фотонную* картину мы рассмотрим только в общих чертах. Полную теорию, описывающую все на основе единой модели, вы узнаете гораздо позже.

В этой главе мы ограничимся той областью, для которой эффективна геометрическая оптика, и, как будет видно в дальнейшем, длина волны и фотонный характер света роли не играют. Мы даже не зададим вопроса, а *что такое свет*, и только опишем *его поведение* в масштабе длин и времен, много больших, чем некоторые характерные величины. Из сказанного ясно, что речь пойдет об очень грубом приближении, потом нам придется «отучаться» от изложенных здесь методов. Но отучимся мы легко, потому что почти сразу перейдем к более точному анализу.

Геометрическая оптика, хотя и является приближением, представляет огромный интерес с технической и исторической точек зрения. На истории этого вопроса мы намеренно остановимся подробнее, чтобы дать представление о развитии физической теории или физической идеи вообще.

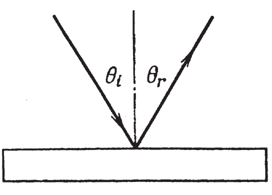
Начнем с того, что свет знаком каждому и известен с незапамятных времен. Возникает первая проблема: каков механизм *видения* света? Теорий было много, но в конце концов они свелись к одной: существует нечто, попадающее в глаз при отражении от предметов. Эта идея существует уже давно и столь привычна, что теперь даже трудно себе представить другие идеи, предложенные, однако, весьма умными людьми, например, что нечто выходит из глаза и чувствует окружающие предметы. Были и другие важные наблюдения: свет распространяется из одной точки в другую *по прямой линии*, если ничто ему не препятствует и лучи света не взаимодействуют друг с другом. Иными словами, свет распространяется в комнате во всевозможных направлениях, но тот луч, который перпендикулярен направлению нашего взгляда, не воздействует на лучи, идущие к нам от какого-либо предмета. В свое время это был сильнейший аргумент против корпускулярной теории света, и его использовал Гюйгенс. Но если представить себе свет в виде пучка летящих стрел, то как могли бы тогда другие стрелы легко пронизывать его? На самом деле ценность таких схоластических доказательств весьма сомнительна. Всегда можно сказать, что свет состоит именно из таких стрел, которые свободно проходят друг через друга!

§ 2. Отражение и преломление

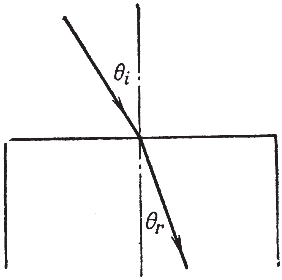
Все сказанное дает представление об основной *идее* геометрической оптики. Теперь перейдем к ее количественному описанию. До сих пор мы разбирали случай, когда свет распространяется между двумя точками по прямой линии. Посмотрим теперь, что происходит, когда свет на своем пути наталкивается на какой-то объект (фиг. 26.1). Простейший объект — это зеркало, и в этом случае мы знаем такой закон: свет, попадая на зеркало, не проходит через него, а отражается и снова уходит по прямой линии, причем направление прямой меняется при изменении наклона зеркала. Еще в древности люди были заняты вопросом: каково соотношение между этими двумя углами? Это очень простое соотношение, и найдено оно было давным-давно. Падающий на зеркало луч после отражения движется по такому пути, что углы между каждым лучом и зеркалом равны. По ряду соображений углы удобно отсчитывать от нормали к поверхности зеркала. Тогда так называемый закон отражения гласит:

$$\theta_i = \theta_r. \tag{26.1}$$

В отличие от простого закона отражения более сложный закон возникает при переходе света из одной среды в другую,



Фиг. 26.1. Угол падения равен углу отражения.



Фиг. 26.2. При переходе из одной среды в другую луч света преломляется.

например из воздуха в воду; здесь тоже свет движется не по прямой. Траектория луча в воде образует некоторый угол с траекторией в воздухе. Когда луч падает почти вертикально, угол отклонения θ_i невелик; если же луч направить под большим углом, отклонение становится значительным (фиг. 26.2). Возникает вопрос: каково соотношение между двумя углами? В древности эта проблема долго ставила людей в тупик, но ответ тогда так и не был найден! Тем не менее именно по этому вопросу можно найти очень редкую в древнегреческой физике сводку экспериментальных данных!

Клавдий Птолемей составил таблицу углов отклонения света в воде для целого ряда углов падения из воздуха. В табл. 26.1 приведены углы в воздухе в градусах и соответствующие углы для воды. (Принято считать, что древние греки никогда не ставили опытов. Но, не зная закона, такую таблицу можно составить только на основании эксперимента.

Таблица 26.1 ● ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПО ПТОЛЕМЕЮ

Угол в воздухе, град	Угол в воде, град
10	8
20	15,5
30	22,5
40	28
50	35
60	40,5
70	45
80	50

Надо отметить, однако, что данные таблицы слишком хорошо ложатся на параболу, поэтому они не могли быть результатом независимых измерений; это лишь ряд чисел, интерполированных по немногим измеренным точкам.)

Это был очень важный шаг в становлении физического закона: сначала мы наблюдаем эффект, затем проводим измерения и сводим результаты в таблицу, после чего пытаемся найти *закон*, по которому одни величины сопоставляются с другими. Приведенная таблица была составлена еще в 140 г. нашей эры, и вплоть до 1621 г. никто не смог найти такого закона, который связал бы эти два угла! Закон был установлен голландским математиком Виллебрордом Снеллом и читается так: пусть θ_i есть угол в воздухе и θ_r есть угол в воде, тогда синус θ_i равен синусу θ_r, умноженному на некоторую константу

$$\sin\theta_i = n\sin\theta_r. \qquad (26.2)$$

Для воды число n равно примерно 1,33. Равенство (26.2) называется *законом Снелла*; он позволяет *предсказать* отклонение света при переходе из воздуха в воду. В табл. 26.2 указаны углы в воде и воздухе, полученные с помощью закона Снелла. Обратите внимание на удивительное согласие с таблицей Птолемея.

Таблица 26.2 ● ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПО ЗАКОНУ СНЕЛЛА

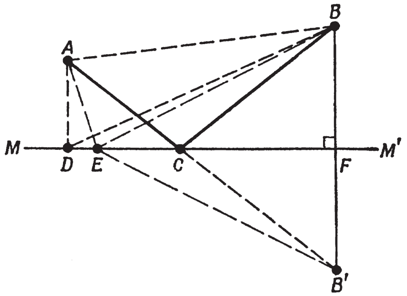
Угол в воздухе, град	Угол в воде, град
10	7,5
20	15
30	22
40	29
50	35
60	40
70	48
80	49,5

§ 3. Принцип наименьшего времени Ферма

По мере развития науки нам хочется получить нечто большее, чем просто формулу. Сначала мы наблюдаем явления, затем с помощью измерений получаем числа и наконец находим закон, связывающий эти числа. Но истинное *величие* науки состоит в том, что мы *можем найти такой способ рассуждения*, при котором закон становится *очевидным*.

Впервые общий принцип, наглядно объясняющий закон поведения света, был предложен Ферма примерно в 1650 г. и получил название *принципа наименьшего времени*, или *принципа Ферма*. Вот его идея: свет выбирает из всех возможных путей, соединяющих две точки, тот путь, который требует *наименьшего времени* для его прохождения.

Покажем сначала, что это верно для случая с зеркалом, что этот простой принцип объясняет и прямолинейность распространения света, и закон отражения света от зеркала. Мы явно делаем успехи!



Фиг. 26.3. Иллюстрация принципа наименьшего времени.

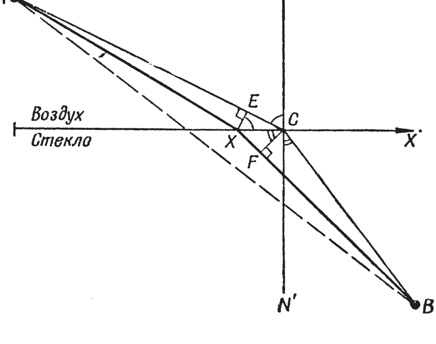
Попытаемся решить следующую задачу. На фиг. 26.3 изображены две точки A и B и плоское зеркало MM'. Каким путем можно за кратчайшее время попасть из точки A в точку B? *Ответ*: по прямой, проведенной из A в B! Но если мы добавим дополнительное условие, что свет должен *попасть* на зеркало, отразиться от него и вернуться снова в точку B опять-таки за кратчайшее время, то ответить не так уж просто. Один путь — как можно скорее добраться до зеркала, а оттуда в точку B, т. е. по пути ADB. Путь DB, конечно, длинен. Если сдвинуться чуть-чуть вправо в точку E, то первый отрезок пути немного увеличится, но зато сильно *уменьшится* второй, и время прохождения поэтому станет меньше. Как найти точку C, для которой время прохождения наименьшее? Воспользуемся для этого хитрым геометрическим приемом.

По другую сторону зеркала MM', на таком же расстоянии от него, что и точка B, построим искусственную точку B'. Затем проведем линию EB'. Поскольку угол BFM прямой и $BF = FB'$, то EB равно EB'. Следовательно, сумма длин двух отрезков $AE + EB$, пропорциональная времени их прохождения (если свет проходит с постоянной скоростью), равна сумме длин $AE + EB'$. Теперь нужно выяснить, когда сумма длин будет наименьшей. *Ответ*: когда точка C будет лежать *на прямой*, соединяющей A и B'! Другими словами, нужно идти к мнимой точке B' (мнимому изображению точки B) и тогда мы найдем точку C. Далее, если ACB' — прямая линия, угол BCF равен углу $B'CF$ и, следовательно, углу ACM. Таким образом, утверждение о равенстве углов падения и отражения равносильно утверждению, что свет при отражении от зеркала в точку B выбирает путь, требующий *наименьшего времени*. Еще Герон Александрийский высказал утверждение, что свет при отражении идет из одной точки в другую по *кратчайшему пути*, так что идея принципа, как видите, не нова. Именно это вдохновило Ферма, и он попробовал применить этот принцип к явлению преломления. Но свет, преломляясь, очевидным образом идет не по *кратчайшему пути*, и тогда Ферма предложил другой принцип — свет выбирает путь, *время* прохождения по которому *наименьшее.*

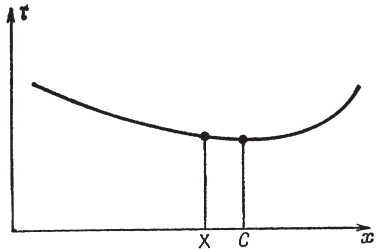
Прежде чем перейти к вопросу о преломлении света, сделаем еще одно замечание об отражении от зеркала. Если поместить источник света в точку B и направить луч на зеркало, свет, отражаясь от зеркала, пройдет из B в A так, как будто бы источник находится в B', а зеркала *нет вообще.* Наш глаз видит только тот свет, который действительно входит в него; и хотя источник расположен в точке B, зеркало направляет свет в глаз точно так, *как будто* источник находится в B', и система глаз — мозг интерпретирует именно так это явление. Поэтому иллюзия, что источник или предмет находится за зеркалом, вызывается только тем фактом, что свет попадает в глаз физически именно так, как если бы предмет действительно был *позади* зеркала (если не принимать во внимание пыль на зеркале и то, что нам известно, что зеркало реально существует, и другие сведения, которые учитывает наш мозг).

Покажем теперь, что из принципа наименьшего времени вытекает закон Снелла для преломления. Мы должны, конечно, что-то предположить относительно скорости света в воде. Будем считать, что скорость света в воде меньше скорости света в воздухе, и отношение второй скорости к первой обозначим через n.

Наша задача по-прежнему состоит в том, чтобы на фиг. 26.4 попасть из точки A в B за *наименьшее время.* Чтобы убедиться, что путь по прямой здесь не самый быстрый, представим себе следующую ситуацию: хорошенькая девушка падает из лодки в воду в точке B и кричит, просит спасти. Линия X — это берег. Вы находитесь на суше в точке A и видите, чтó произошло, вы умеете плавать и умеете бегать. Но бегаете вы быстрее, чем плаваете. Что вам делать? Бежать по прямой к берегу? (Конечно!) Но, немного поразмыслив, вы поймете, что выгоднее пробежать несколько дольше по



***Фиг. 26.4.** Иллюстрация принципа Ферма для случая преломления.*



Фиг. 26.5. Наименьшее время получается при выборе точки С.

Соседние точки приводят примерно к такому же времени прохождения.

берегу, чтобы уменьшить ваш путь в воде, потому что в воде вы будете двигаться гораздо медленнее. (Рассуждая таким образом, лучше всего было бы заранее тщательно *вычислить* путь!) Во всяком случае, давайте попытаемся показать, что окончательное решение задачи — это путь ACB, который занимает из всех возможных наименьшее время. Если этот путь кратчайший по времени, то любой другой окажется длиннее. Поэтому если отложить на графике зависимость времени от положения точки X, получится кривая, похожая на изображенную на фиг. 26.5, где точка C соответствует наименьшему времени. Это означает, что для точек X *вблизи* C в первом приближении время прохождения практически *одинаковое*, так как в точке C наклон кривой равен нулю. Итак, наш способ найти искомый путь сводится к требованию, чтобы при небольшом изменении положения точки время прохождения не менялось. (Конечно, возникнут бесконечно малые изменения времени *второго* порядка, и они должны быть положительными при смещении в обе стороны от точки C.) Возьмем близкую точку X, вычислим время прохождения на пути AXB и сравним его со старым путем ACB. Сделать это очень просто. Конечно, нужно еще, чтобы разность времен стремилась к нулю для малых расстояний XC. Обратимся сначала к пути по суше. Если мы опустим перпендикуляр EX, то легко увидим, что наш путь стал короче на длину EC. Можно сказать, что это расстояние мы выиграли. С другой стороны, опустив перпендикуляр CF, мы увидим, что в воде приходится проплыть дополнительное расстояние XF. В этом мы проиграли. С точки зрения экономии *времени* выигрывается время на отрезке EC, но теряется на отрезке XF. Эти два интервала времени должны быть равны, так как в первом приближении полное время прохождения не меняется. Предположив, что скорость в воде равна скорости в воздухе, умноженной на $1/n$, получим

$$EC = nXF. \tag{26.3}$$

Поэтому мы видим, что если нам удалось правильно выбрать точку C ($XC \sin EXC = nXC \sin XCF$) или мы сократили на длину общей гипотенузы XC и заметили, что

$$EXC = ECN = \theta_i \quad \text{и} \quad XCF = BCN' = \theta_r,$$

то мы получим

$$\sin\theta_i = n\sin\theta_r. \qquad (26.4)$$

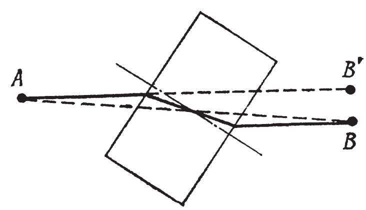
Отсюда видно, что при отношении скоростей, равном n, свет должен двигаться из одной точки в другую по такому пути, чтобы отношение синусов θ_i и θ_r было равно отношению скоростей в двух средах.

§ 4. Применения принципа Ферма

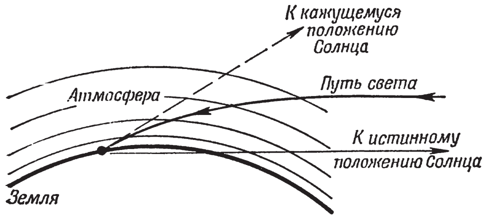
Рассмотрим теперь некоторые интересные следствия принципа наименьшего времени. Первое из них — принцип обратимости. Мы уже нашли путь из A в B, требующий наименьшего времени; пойдем теперь в обратном направлении (считая, что скорость света не зависит от направления). Наименьшему времени отвечает та же траектория, и, следовательно, если свет распространяется по некоторому пути в одном направлении, он будет двигаться по этому пути и в обратном направлении.

Другой интересный пример! На пути света под некоторым углом поставлена четырехгранная стеклянная призма с параллельными гранями. Свет проходит из точки A в B и, встретив на своем пути призму (фиг. 26.6), отклоняется, причем длительность пути в призме уменьшается за счет изменения наклона траектории, а путь в воздухе немного удлиняется. Участки траектории вне призмы оказываются параллельными друг другу, потому что углы входа и выхода из призмы одинаковы.

Третье интересное явление состоит в том, что когда мы смотрим на заходящее солнце, то оно на самом деле находится уже ниже линии горизонта! Нам *кажется*, что солнце еще над горизонтом, а оно фактически уже зашло (фиг. 26.7). Дело здесь в следующем. Земная атмосфера вверху разрежена, а в нижних слоях более плотная. Свет распространяется в воздухе медленнее, чем в вакууме, и поэтому солнечные лучи достигнут какой-то точки за горизонтом быстрее, если будут двигаться не по прямой линии, а по траектории с более крутым наклоном в плотных слоях атмосферы, сокращая таким образом свой путь в этих слоях.



Фиг. 26.6. *Луч света, выходящий из прозрачной пластины, параллелен падающему лучу.*



Фиг. 26.7. У горизонта Солнце кажется на $^1/_2$ градуса выше, чем на самом деле.

Еще пример того же рода — мираж, который часто наблюдают путешественники на раскаленных солнцем дорогах. Они видят на дороге «воду», а когда подъезжают туда, то кругом оказывается все сухо, как в пустыне! Сущность явления в следующем. То, что мы видим в этом случае, это «отраженный» доро́гой свет. На фиг. 26.8 показано, как падающий на дорогу луч света попадает к нам в глаз. Почему? Воздух сильно раскален над самой дорогой, а в верхних слоях холоднее. Горячий воздух, расширяясь, становится более разреженным, а потому и скорость света в нем больше, чем в холодном. Другими словами, свет быстрее проходит в теплых слоях, чем в холодных. Поэтому свет проходит не по прямой, а идет по траектории с наименьшим временем, заворачивая для этого в теплые слои воздуха, чтобы сократить время. Таким образом, свет идет по кривой.

И еще один пример. Представим себе такую ситуацию, когда весь свет, испускаемый в точке P, собирается обратно в другую точку P' (фиг. 26.9). Это означает, конечно, что свет может попасть из точки P в P' по прямой линии. Это правильно. Но как устроить так, чтобы свет, идущий от P к Q, тоже попал в P'? Мы хотим собрать весь свет снова в одной точке, которую называют *фокусом*. Как это сделать? Поскольку свет всегда выбирает путь с наименьшим временем, то наверняка он не пойдет по другим предложенным нами путям. Единственный способ сделать целый ряд близлежащих траекторий приемлемыми для света — это устроить так, чтобы для всех время прохождения было точно *одинаковым*! В противном случае свет пойдет по траектории, требующей минимального времени. Поэтому задача построения фокусирующей системы сводится просто к созданию устройства, в котором свет тратит на *всех* путях одинаковое время!

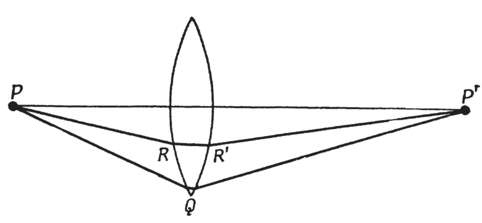
Такое устройство создать просто. Возьмем кусок стекла, в котором свет движется медленее, чем в воздухе (фиг. 26.10).

Фиг. 26.8. Мираж.

Фиг. 26.9. Оптический «черный ящик».

Проследим путь луча света, проходящего в воздухе по линии PQP'. Этот путь длиннее, чем прямо из P в P', и наверняка занимает больше времени. Но если взять кусок стекла нужной толщины (позже мы вычислим, какой именно), то путь в нем скомпенсирует добавочное время, затрачиваемое при отклонении луча на траектории PQP'. При этих условиях можно устроить так, чтобы время, затрачиваемое светом на пути по прямой, совпадало со временем, затрачиваемым на пути PQP'. Точно так же, если взять частично отклоненный луч $PRR'P'$ (более короткий, чем PQP'), то придется скомпенсировать уже не так много времени, как для прямолинейной траектории, но некоторую долю времени все же скомпенсировать придется. В результате мы приходим к форме куска стекла, изображенной на фиг. 26.10. При такой форме весь свет из точки P попадет в P'. Все это нам известно уже давно, и называется такое устройство собирательной *линзой*. В следующей главе мы вычислим, какой должна быть форма линзы, чтобы получить идеальную фокусировку.

Наконец, последний пример. Предположим, что нам нужно так поставить зеркало, чтобы свет из точки P всегда приходил в P' (фиг. 26.11). На любом пути свет должен отразиться от зеркала, и время для всех путей должно быть одинаковым. В данном случае свет проходит только в воздухе, так что время прохождения пропорционально длине пути. Поэтому требование равенства времен сводится к требованию равенства полных длин путей. Следовательно, сумма расстояний r_1 и r_2 должна оставаться постоянной. *Эллипс* обладает как раз тем свойством, что сумма расстояний любой точки на его кривой от двух заданных точек постоянна; поэтому свет, отразившись от зеркала, имеющего такую форму, наверняка попадет из одного фокуса в другой.



Фиг. 26.10. Фокусирующая оптическая система.