1.4. Геометрия в меньшем масштабе

Изложенные выше наблюдения относятся к среднему радиусу кривизны мирового пространства, и на них не влияют искажения, которые, по-видимому, можно обнаружить в непосредственной близости к отдельным звездам. Эти искажения создают местные неоднородности геометрии мирового пространства, в среднем плоского или обладающего очень малой кривизной. Даже для части пространства, близкой к нашему Солнцу, очень трудно экспериментально обнаружить подобные неоднородности. В результате точных и сложных наблюдений положения звезд, видимых вблизи края Солнца во время солнечного затмения (рис. 1.13), было установлено, что световые лучи слегка искривляются, когда они проходят вблизи края Солнца, и по аналогии следует предполагать, что они всегда должны искривляться вблизи любой другой столь же массивной звезды. Для луча, касающегося края Солнца, угол изгиба очень мал и составляет только 1,75″ (рис. 1.14). Таким образом, если бы мы могли видеть звезды при дневном свете, то те из них, которые были бы видны близко к краю Солнца, казались бы нам лишь очень мало отклонившимися от своих нормальных положений. Это означает только, что вблизи Солнца свет движется по кривой; само по себе это еще не означает, что пространство вокруг Солнца обязательно обладает кривизной. Только произведя вблизи поверхности Солнца точные измерения с помощью масштабов из разных материалов, мы могли бы непосредственно установить, что наиболее правильное и естественное описание этого явления должно быть основано на представлении о пространстве, обладающем кривизной.

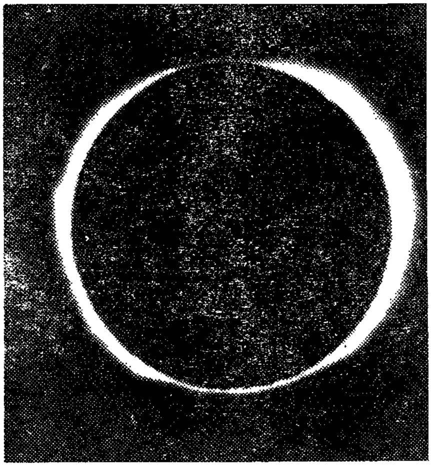

Рис. 1.13. Солнечное затмение 20 июля 1963 г. (*Фотоснимок Клименшоу, Обсерватория Гриффит*)

С представлением о возможности кривизны пространства согласуется еще одна серия наблюдений: орбита Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты, немного отличается от рассчитанной теоретически на основании ньютоновских законов всемирного тяготения и движения, даже если в расчеты орбиты введены соответствующие небольшие поправки, следующие из специальной теории относительности (рис. 1.15). Могло бы это быть следствием кривизны мирового пространства вблизи Солнца? Для ответа на этот вопрос нам надо знать, как повлияла бы возможная кривизна пространства на уравнения движения Меркурия, а это требует большего, чем только решение геометрической задачи.

В ряде замечательных, изящных статей Эйнштейн (1917) изложил теорию тяготения и геометрии мирового пространства, названную общей теорией относительности. Эта теория дает двум описанным явлениям объяснение, количественно согласующееся с результатами наблюдений. Эти явления представляют собой пока единственные прямые подтверждения геометрических выводов общей теории относительности. Несмотря на такое малое количество подтверждений, общая теория относительности широко признана из-за своей принципиальной простоты.

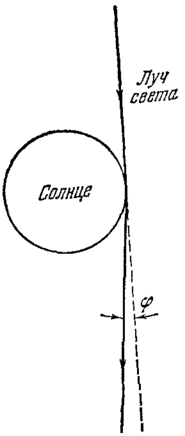

Рис. 1.14. Причиной изгиба линии, по которой распространяется свет, является действие притяжения Солнца, как было предсказано Эйнштейном в 1917 г. и вскоре после этого подтверждено наблюдениями. $\varphi = 8\cdot 10^{-6}$ *рад* $= 1{,}75''$.

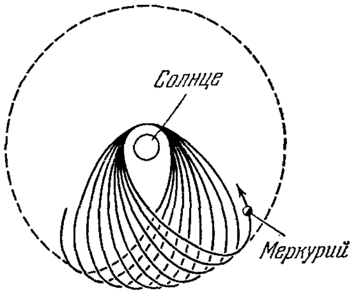

Рис. 1.15. Схема вращения орбиты Меркурия, объясняемого общей теорией относительности. Плоскость орбиты — это плоскость рисунка; с целью наглядности сильно преувеличен эксцентриситет орбиты. Если бы этого вращения не было, то орбита Меркурия представляла бы собой неподвижный эллипс.

На основании результатов астрономических измерений мы сделали вывод, что евклидова геометрия дает нам исключительно хорошее описание измерений длин, площадей и углов по меньшей мере до тех пор, пока мы не достигнем огромных длин, порядка 10^{28} *см* и выше.

До сих пор ничего не говорилось о применимости евклидовой геометрии для описания очень маленьких конфигураций, сравнимых по величине с размерами атома (10^{-8} *см*) или атомного ядра (10^{-12} *см*). Вопрос о том, справедлива ли здесь евклидова геометрия, надо сформулировать следующим образом: можем ли мы получить правильное представление о внутриатомном мире и создать эффективную теорию, описывающую этот мир, сохраняя предположение о выполнимости аксиом евклидовой геометрии? Если можем, то нет оснований подвергать сомнению применимость евклидовой геометрии в качестве достаточно хорошего приближения. Мы увидим в т. IV, что теория атомных и внутриатомных явлений, по-видимому, не приводит к парадоксам, препятствующим нашему пониманию этих явлений. Многие факты еще остаются непонятными, но среди них нет таких, которые приводили бы к противоречиям из-за геометрических причин. В этом смысле евклидова геометрия выдерживает экспериментальную проверку по меньшей мере вплоть до размеров порядка 10^{-13} *см*.

1.5. Инвариантность

Мы можем сформулировать некоторые следствия экспериментально доказанного утверждения о том, что евклидова геометрия применима к физическим явлениям.

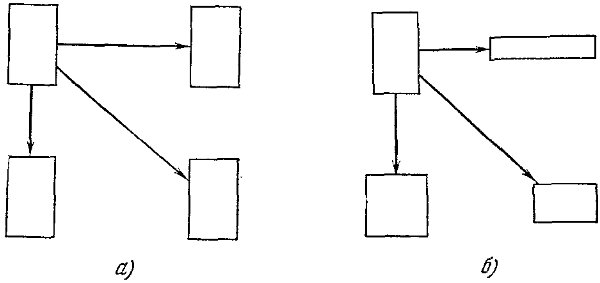

Рис. 1.16. *а*) Инвариантность по отношению к параллельному переносу. Перенос предмета в любое другое место не изменяет ни его размеров, ни формы. *б*) Неинвариантность по отношению к параллельному переносу в гипотетическом мире. Перенос предмета в другое место мог бы вызвать изменение его размеров или формы.

Инвариантность по отношению к параллельному переносу. Под этим мы подразумеваем, что пространство однородно и что оно не изменяется от точки к точке. Если тела перемещаются без поворота, т. е. остаются параллельными своему первоначальному положению, то их свойства не изменяются (рис. 1.16).

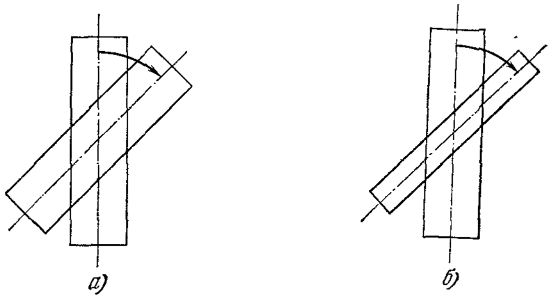

Рис. 1.17. *а*) Инвариантность по отношению к повороту. Поворот предмета не изменяет ни его размеров, ни формы. *б*) Неинвариантность по отношению к повороту в гипотетическом мире. Поворот предмета мог бы вызвать изменение его размеров или формы.

Инвариантность по отношению к повороту. Из опыта известно, что с большой степенью точности пространство является изотропным, так что все направления эквивалентны и физические тела не изменяются при повороте (рис. 1.17). Можно представить себе плоское пространство, не являющееся изотропным, например такое