

виднее каждая отдельная стандартная свеча, тем полезнее те данные, которые могут быть получены из статистической информации, касающейся ее кажущегося расстояния, светимости и красного смещения.

В 1966 г. Г. Арп (Паломарская обсерватория) опубликовал данные, из которых следовало, что невероятно большой процент квазаров оказался в кажущейся тесной близости с другими астрономическими объектами, расстояние которых от Земли было хорошо известно и составляло около 10^8 световых лет. Данные Арпа — статистические в том смысле, что они предполагают действительную ассоциацию квазаров с другими объектами не потому, что налицо видимая близость в отдельных случаях, а из-за того, что это имеет место для преобладающего числа случаев. Эти рассуждения не слишком надежны, и положиться на них безоговорочно нельзя. Если они все же окажутся верными, все принятые в настоящее время оценки светимости, массы, размеров и других характеристик квазаров должны снизиться на несколько порядков. Наблюдаемые красные смещения могут быть тогда гравитационного происхождения, указывая на крайне экзотическую структуру квазаров. Иначе, красное смещение может быть интерпретировано как доплеровское смещение. Последняя интерпретация означает, что все известные квазары удаляются от Земли с релятивистскими скоростями. Это едва ли можно допустить.

Если бы наблюдаемые красные смещения были гравитационными, квазары создавали бы самые сильные гравитационные поля, какие наблюдались где-либо во Вселенной. Квазары оказались бы самыми подходящими кандидатами для релятивистских лабораторий вне Земли, правда, не очень доступными лабораториями. Очевидно, квазары принадлежат к самым мало понятным астрономическим объектам, и каким бы ни оказалось их расстояние от Земли, они надолго сохранят свое очарование для тех, кто занимается теорией относительности.

21. Движение частиц

Релятивистская физика рассматривает большие массы с высокой концентрацией вещества, гравитационные волны и космологические проблемы. Это уже сложившийся круг вопросов. При рассмотрении этих проблем, как впро-

чем, и при использовании данных наблюдений для проверки самой теории, общая теория относительности вступает в непосредственное соприкосновение с экспериментом и данными наблюдений. Кроме того, сама теория была подвергнута дальнейшему анализу. Нельзя не отметить, что общая теория относительности во многих отношениях отличается от других физических теорий. Заключительные главы этой книги посвящены теоретическим работам, некоторые из которых даже не закончены.

Основной особенностью общей теории относительности является то, что ее законы остаются неизменными независимо от того, какую систему координат мы выбираем. В свободном пространстве гравитационное поле подчиняется законам, которые в некоторых отношениях напоминают законы, управляющие другими физическими полями; самыми важными среди них являются законы электромагнитного поля. Но тогда как все другие известные сейчас в физике законы полей выглядят по-разному в зависимости от того, какие используются координаты (прямолинейные или криволинейные, прямоугольные или косоугольные), эйнштейновские законы гравитационного поля во всех координатных системах сохраняют в точности ту же самую математическую форму. Такая свобода выбора системы координат может быть использована в самых различных направлениях. Обычная техника состоит в том, что сравниваются те различные формы, которые конкретное поле принимает при его описании с помощью различных координатных систем, и используется то обстоятельство, что все эти формы должны подчиняться одинаковым законам (дифференциальным уравнениям). Две координатные системы могут быть тождественны друг другу в некоторой области изменений временной координаты, но могут различаться вне этой области (рис. 67). Две соответствующие формы, которые принимает конкретное поле, будут также тождественны в той области, где две используемые координатные системы совпадают, но будут отличаться друг от друга вне этой области. Отсюда следует, что в общей теории относительности математическая форма поля в течение заданного периода времени отнюдь не определяет однозначным образом форму поля за пределами этого периода.

Отсутствие однозначности при продолжении решений уравнений поля по временной оси (или в этом же смысле

вдоль любой другой оси) влечет за собой глубокие выводы, касающиеся математической структуры уравнений. На первый взгляд законы гравитационного поля (в том виде, в каком они постулируются общей теорией относительности) напоминают законы любой другой теории поля. Число уравнений равно числу компонент поля. Их десять. Но во всех других теориях поля каждое из таких уравнений определяло скорость изменения со временем

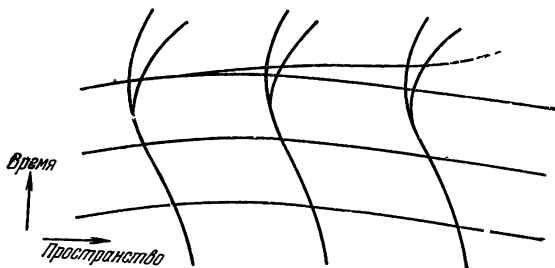


Рис. 67. Две координатные системы, совпадающие друг с другом некоторое время.

одной из переменных поля; если в какой-то момент времени значения всех переменных поля в каждой точке пространства определены экспериментально, уравнения поля определяют скорость, с которой изменяются все эти переменные, и, следовательно, значения этих переменных во все последующие моменты времени.

В общей теории относительности четыре координаты, используемые для идентификации мировых точек, могут быть продолжены произвольно от любого начального момента времени; продолжение поля в будущее (или прошлое) в этом смысле произвольно. В соответствии с этим из десяти уравнений поля только шесть имеют отношение к продолжению поля в будущее; четыре переменных поля могут иметь произвольную скорость изменения. Остающиеся четыре уравнения поля определяют условия, ограничивающие выбор переменных поля в заданный начальный момент времени.

Такие ограничения не имеют аналогов в обычных теориях поля. Вместе с тем они характерны для любой теории, которая должна предоставить число уравнений поля, равное числу переменных поля, причем так, что эти

уравнения должны подчиняться принципу общей ковариантности. Если, например, общая теория относительности обобщена таким образом, что в нее включено электромагнитное поле и, быть может, другие поля без нарушения общей ковариантности, четыре уравнения все равно не будут иметь отношения к продолжению полей в будущее, а будут указывать ограничения, налагаемые на возможные начальные ситуации.

Если ограничения на начальные ситуации удовлетворяются в какой-то момент времени, уравнения поля автоматически обеспечивают их сохранение на будущее; нет никакой необходимости еще раз накладывать эти ограничения в какой-либо другой момент времени. В этом смысле четыре уравнения, ограничивающие начальные ситуации, и шесть уравнений поля, определяющих продолжение полей во времени, вполне согласуются друг с другом. Все вместе они определяют движение частиц под действием поля.

В характерной для небесной механики ситуации большая часть пространства свободна от вещества; в этих областях пространства есть только гравитационное поле, которое подчиняется уравнениям поля для вакуума. Небесные тела — источники гравитационного поля — занимают очень малые области пространства, отделенные друг от друга обширными пустотами. Могут ли эти источники гравитационного поля двигаться совершенно свободно или же на них оказывают влияние окружающие поля? В теории тяготения Эйнштейна такое влияние действительно существует, тогда как в других теориях поля источники могут свободно двигаться произвольным образом. В электродинамике, например, источники электромагнитного поля — электрические заряды — могут направляться и двигаться как угодно при наличии любых не электрических сил, а электромагнитное поле все равно будет удовлетворять уравнениям поля — уравнениям Максвелла. В теории тяготения, однако, нельзя математически построить никакого поля в пространстве, окружающем тяготеющую массу (и подчиняющемуся уравнениям Эйнштейна), если каждая из масс не будет удовлетворять четырем условиям. Одно из этих условий определяет зависимость массы тяжелого тела от времени, остающиеся три налагают ограничения на три компоненты его движения. Когда рассматривается

одно тяжелое тело, эти четыре условия требуют, чтобы масса тела и его скорость оставались постоянными. Если имеются еще и другие тела, из тех же самых условий будет вытекать взаимное притяжение тяжелых масс (ускорение относительно друг друга).

На первый взгляд этот теоретический вывод ведет к определенным трудностям. В общей теории относительности нет необходимости для отделения и разделения законов для поля и для движения тяжелых тел, так как законы движения тел уже заключены в уравнениях поля. Таким образом, теория исключает всякую возможность манипулирования источниками гравитационного поля внешними воздействиями, как это допускается, скажем, в теории электромагнитного поля и практически реализуется в лабораторных условиях. Не противоречит ли такая жесткость теории тяготения нашему повседневному опыту?

Ответ нужно искать в принципе эквивалентности. Чтобы манипулировать электрическими зарядами или гравитационными массами, требуются определенные устройства. Нетрудно создать аппаратуру, нейтральную по отношению к электрическим зарядам. Присутствие аппаратуры, обладающей этим свойством, ничего не внесет в электрическое поле. Однако устройства, предназначенные для перемещения тяжелых тел, сами всегда обладают такими свойствами, как масса и натяжения; а это означает, что эти устройства в свою очередь являются источниками гравитационного поля. Даже до появления теории относительности третий закон Ньютона утверждал, что любой агент, способный вызывать силы, испытывает силу противодействия. В зависимости от своей собственной массы прибор получает ускорение. Когда ньютоновская теория была видоизменена и заменена эйнштейновской теорией, было выяснено, что полное гравитационное поле подчиняется всем условиям, требуемым этой теорией, лишь в том случае, когда справедлив закон действия и противодействия. Таким образом, никакого парадокса и не существовало. Напротив, поскольку законы поля включают в себя также и законы, определяющие движение источников поля, математическое согласие этих законов заранее обеспечено. Обеспечено также сохранение полной массы и полного импульса. Последний результат достигался в других теориях поля отнюдь не малыми математическими ухищрениями.