

Когда поле есть временная компонента вектора, решение также известно; это как раз электромагнитный случай. Мы не будем его детально анализировать, а сделаем лишь следующие замечания. Преобразуя систему зарядов из покоящейся в движущуюся систему отсчета, мы в общем случае получаем, что векторное поле приобретает ненулевые пространственные компоненты A_1, A_2, A_3 , которые отвечают магнитному полю. Однако в сферически-симметричном случае нет магнитного поля, даже если отдельные заряды движутся. Более того, внешнее электрическое поле одинаково для системы движущихся зарядов, заключенных в сферический сосуд (стационарная задача) и для оболочки из зарядов, движущихся радиально (нестационарная задача). Однако векторный потенциал, являющийся суммой потенциалов отдельных частиц, различен в этих двух случаях. Для нестационарной задачи полный векторный потенциал имеет ненулевую радиальную компоненту A_r , которая вносит вклад в радиальное электрическое поле: $E = -\frac{\partial\varphi}{\partial t} - \frac{\partial A_r}{\partial t}$. Хотя A_r зависит от скоростей зарядов, E не зависит от скорости. Следовательно, изменяя калибровку

$$\varphi \rightarrow \varphi + \frac{\partial f}{\partial t}, \quad A \rightarrow A - \nabla f,$$

мы можем аннулировать A_r , получая в результате $\varphi = \frac{eN}{r}$ вне источника.

Эти калибровочно преобразованные потенциалы $A = 0$ и $\varphi = \frac{eN}{r}$ для нестационарной задачи идентичны потенциалам стационарной задачи, что и было отмечено в тексте.

Независимость внешнего поля от стационарности или нестационарности источника для электромагнитного случая обусловлена тем фактом, что векторный потенциал (в противоположность скалярному потенциалу) не может иметь сферических волн.

Аналогичные замечания могут быть сделаны и в тензорном случае. Выражение для $\varphi = h_{00}$ приведено в тексте для системы координат, в которой h_{α} исчезают.

§ 4. Неизбежность идеи кривизны пространства — времени

РТТП может быть полезной заменой ОТО в некоторых задачах. Но каково принципиальное соотношение между двумя теориями? Чрезвычайно ясный и поучительный анализ проблемы дал Тирринг (1961). Как упомянуто выше, РТТП количественно правильно описывает такие важнейшие эффекты, как отклонение луча света в поле тяготения и красное смещение кванта, испущенного осциллятором (атомом), находящимся вблизи тяжелого тела.

Первый эффект получается за счет того, что в этой теории уравнения Максвелла в пустом пространстве изменяются. Это изменение соответствует появлению показателя преломления, зависящего от гравитационного потенциала: это и необходимо, чтобы получить искривление светового луча. Но какой ценой получено согласие с опытом: скорость распространения электромагнитных волн, скорость света, уже не равна фундаментальной константе c !

Обратимся ко второму эффекту — красному смещению линий. В РТТП в поле тяжелого тела есть система координат, где

это тело покоится, и в этой системе есть определенное время, которое везде течет одинаково. Временной интервал между двумя событиями, происшедшими на поверхности тела, в точности равен временному интервалу между приемом двух соответствующих сигналов в удаленной точке *). Красное смещение объясняется тем, что гравитационный потенциал реально влияет на колебания осциллятора, замедляя их.

Время течет вблизи тела так же, как и на бесконечности, осциллятор колеблется медленнее, чем на бесконечности. Но также замедляются и любые другие процессы. Никакое локальное измерение частоты колебаний осциллятора не обнаружит ее (частоты) изменения, так как в том же отношении замедляются часы, находящиеся рядом в том же гравитационном потенциале.

Особенно неприятно, что влияет на процессы не поле, а именно потенциал, величина непосредственно локально не измеряемая.

Изменим потенциал на постоянную величину: все наблюдаемые соотношения между числом колебаний осциллятора и числом качания маятника часов и т. п. останутся без изменений, хотя сами частоты, измеренные по «абсолютному» времени **), будут другими.

Наглядно можно представить себе такой опыт: окружим земной шар тяжелой полый оболочкой. Потенциал на Земле изменится, хотя все поля останутся без изменений. Все результаты земных опытов останутся без изменений, но с точки зрения РТТПП по абсолютному времени (хранитель абсолютного времени по определению находится на бесконечности) процессы текут медленнее.

Итак, абсолютное время в теории в плоском пространстве существует, но никакими опытами, проделанными вблизи поверхности тела, его определить нельзя. Ясно, что такая ситуация очень похожа на ситуацию с эфиром в начале нашего века и подводит к выводу о том, что это абсолютное время является фикцией. В космологической проблеме, где нас окружает безграничное пространство с постоянной (в среднем) плотностью вещества, его даже нельзя определить.

Тирринг рассматривает вопрос более формально; он показывает, что существует преобразование потенциала ***), оставляющее

*) Как бы ни влияло поле тяготения на прохождение сигналов, время прохождения первого и второго сигналов в постоянном поле одинаково, и оно сокращается при вычислении временного интервала.

**) Понятие «абсолютного» времени здесь употребляется в смысле независимого от поля тяготения. Это время меняется при переходе к движущейся системе отсчета, в соответствии с преобразованиями Лоренца, и этим отличается от ньютоновского абсолютного времени.

***) По типу градиентного преобразования в электродинамике, когда к скалярному потенциалу ϕ добавляют $\frac{df}{dt}$, а к векторному A соответственно $\text{grad } f$, где f — произвольная функция; напомним, что в РТТПП потенциал — тензорный, т. е. имеет не одну компоненту, а 10.

без изменения наблюдаемые величины; однако при этом преобразовании течение времени и ход часов по «абсолютному» времени изменяются. Другими словами, абсолютное время не инвариантно относительно преобразования. При этом изменение может быть разным в разных точках.

Теория РТТПП сама подводит к идее искривления пространства — времени, сама (при ее последовательном развитии) приводит к основным идеям ОТО.

Итак, последовательная РТТПП, совпадающая с ОТО в первых поправках к ньютоновскому закону, для объяснения универсальности действия поля тяготения вынуждена прибегать к нефизическим гипотезам о ненаблюдаемом «абсолютном» времени, о влиянии на все процессы ненаблюдаемой величины — потенциала тяготения и т. п.

Идея кривизны пространства — времени, лежащая в основе ОТО, сразу же разрешает все трудности РТТПП, и с гениальной простотой объясняет универсальность действия поля тяготения.

Из сказанного следует, что, несмотря на скудность экспериментов, проверяющих ОТО, только эта теория, обладающая необыкновенной стройностью, внутренней красотой и убедительностью, может являться современной теорией тяготения.

Конкретные уравнения ОТО, связывающие кривизну пространства — времени с материей, конечно, не единственные из мыслимо возможных уравнений такого рода. Возможны, например, уравнения выше второго порядка. Вопрос о единственности уравнений ОТО в этом смысле неоднократно обсуждался, начиная с работ самого Эйнштейна. Поучительный анализ проблемы можно найти в книге Эддингтона (1934). Более поздние обсуждения предположений, лежащих в основе ОТО, можно найти у Траутмана, Пирани и Бонди (1965), Элерса (1965), Траутмана (1966). Уравнения ОТО в известном смысле являются простейшими из возможных. Какое-либо изменение уравнений ОТО может быть произведено только по новым глубоким теоретическим и экспериментальным соображениям (о так называемом Λ -члене в уравнениях тяготения см. § 8а гл. 1).

Практическое удобство РТТПП как приближения к ОТО, отмеченное выше, ограничивается случаем изолированных тел и слабых полей в бесконечном пустом пространстве. О неприменимости РТТПП в космологической проблеме сказано выше. Но РТТПП не годится и для описания гравитационного поля коллапсирующей звезды вблизи ее шварцшильдовского радиуса (см. гл. 3).

Дело в том, что последовательная РТТПП должна быть нелинейной теорией. Это видно уже из того, что поле двух тел на большом расстоянии меньше суммы полей каждого тела в отдельности из-за гравитационного дефекта массы; взаимодействие тел

уменьшает энергию, а значит, и массу системы. Нелинейность можно проследить и в случае гравитационных волн, но на этом мы не останавливаемся.

В области, где нелинейность существенна, РТТПП теряет все свое практическое удобство и становится невероятно громоздкой. Задачу о поле тела вблизи гравитационного (шварцшильдовского) радиуса (см. § 2 гл. 3) никто и не пытался решить в РТТПП.

По этим причинам в дальнейшем пользоваться РТТПП мы почти не будем. Принципиальные же преимущества, необходимость и неизбежность ОТО и искривления пространства — времени были показаны выше.

§ 5. О возможности вычисления гравитационной постоянной на основе теории элементарных частиц

В ОТО, так же как и в теории тяготения Ньютона, гравитационная постоянная G рассматривается как определяемая из опыта мировая постоянная. Ни в ОТО, ни в ньютоновской теории не делается попытка выразить G через какие-то другие, более элементарные величины.

Ниже излагается такая попытка, принадлежащая Сахарову (1967). В настоящее время попытка не привела к определенным конкретным достижениям, в формулу для G входит другая неизвестная величина. Тем не менее, новизна принципиального подхода и новый взгляд на саму сущность явления в указанной работе заслуживают внимания.

В ньютоновской теории G характеризует силу взаимодействия частиц между собой; характерной величиной является энергия двух частиц — Gm_p^2/r , которая (для двух протонов) в 10^{37} раз меньше электростатической энергии e^2/r на равном расстоянии. Безразмерной величиной является $Gm_p^2/e^2 = 10^{-36}$ или $Gm_p^2/\hbar c = 10^{-38}$, и теория должна дать ответ на вопрос о том, откуда появляются безразмерные числа, так сильно отличающиеся от единицы. Некоторые теоретики связывают это обстоятельство с идеей о влиянии всей Вселенной на локальные явления, грубо говоря, с тем, что Вселенная велика. Убедительных соображений о таком влиянии нет и мы к такому подходу относимся отрицательно.

Для Сахарова исходным пунктом является другой подход к теории тяготения, характерный для ОТО и связывающий гравитацию с представлениями о кривизне пространства — времени.

Вся ОТО содержится в выражении действия. Для частиц и гравитационного поля действие может быть записано в виде

$$S = - \sum mc \int ds - \frac{c^3}{16\pi G} \int R dV, \quad (2.5.1)$$