

тяготения — эти предсказания великолепно, со всей точностью современной техники подтверждены опытом.

Еще одно предсказание ОТО состоит в том, что в пустом пространстве могут распространяться волны кривизны — так называемые *гравитационные волны*. Эти волны во многом подобны электромагнитным: они имеют такую же скорость распространения c , несут энергию и импульс. Гравитационные волны вызывают движение тел, лежащих на их пути, но реально ожидаемый эффект столь мал, что до сих пор он не наблюдается.

Источником гравитационных волн является, например, двойная звезда. При этом двойная звезда сама теряет энергию, расстояние между двумя звездами уменьшается, так же как электрон приближается к ядру при испускании электромагнитных волн *). При этом меняется — уменьшается — период обращения двойной звезды.

Этот эффект был наблюден несколько лет тому назад. Таким образом, ситуация с гравитационными волнами в настоящее время такая же, как с нейтрино в 1932—1952 гг.: мы наблюдаем эффекты, зависящие от испускания гравитационных волн, но не умеем обнаруживать сами волны.

И все-таки подчеркнем, что точнейшие измерения количественно подтвердили предсказание ОТО о существовании и испускании гравитационных волн.

Тяготение и другие силы

Создание ОТО является замечательным творением человеческого разума. Недаром Эйнштейн говорил, что другие его работы — специальная теория относительности, теория броуновского движения как часть термодинамики, теория фотонов (сегодня можно добавить индуцированное излучение и статистику Бозе — Эйнштейна) шли в русле исследований науки своего времени. То, что он сделал, было бы сделано без него другими, может быть, на два-три года позже.

Однако он делал исключение для ОТО: открытие ОТО могло бы задержаться на 50 лет!

*) Понятно, что в случае двойной звезды (в отличие от атома) квантовые эффекты не играют роли.

Показательно, как мало экспериментальных предпосылок понадобилось Эйнштейну: только равенство ускорений всех тел и, как вывод отсюда, принцип эквивалентности тяготения и ускорений системы координат (включающий невесомость в падающем лифте).

Добавив к этому общую геометрическую идею Лобачевского — Римана о возможности искривления пространства, Эйнштейн построил полную теорию тяготения!

При этом теория тяготения оказалась внешне совершенно не похожей на электродинамику Максвелла. Пафос Максвелла — поля, пафос Эйнштейна — отказ от какого-либо поля!

Но невозможно отрицать глубокое сходство явлений, вплоть до распространения электромагнитных и гравитационных волн с одинаковой скоростью.

Как же увидеть внутреннюю связь, причины сходства двух рядов явлений? После создания и подтверждения ОТО Эйнштейн все свои силы на протяжении 40 лет изнуряющей работы прилагал к созданию «единой теории» и в первую очередь — к созданию геометрической теории электромагнетизма.

Все развитие физики за эти годы казалось противоречащим идее объединения всех физических законов и превращения физики в геометрию. Именно период с 1915 г. по настоящее время отличается тем, что физики открывали все новые и новые частицы — нейтрон, позитрон, нейтрино, странные частицы, мезоны и W^{\pm} , и Z -частицы, кварки, глюоны — не будем повторять все сказанное в предыдущих главах.

Картина мира становилась все более пестрой и многокрасочной. Соответственно, казалось все менее вероятным сведение всего разнообразия частиц, полей и взаимодействий к единому геометрическому образу.

Еще один количественный довод, казалось, давал веский аргумент *против* объединения теории тяготения и всей остальной физики.

Этот довод восходит к 1900 г. Когда Планк открыл существование величины, называемой ныне постоянной Планка, в законе излучения, он сразу определил ее размерность. В современных обозначениях $h = 1,05 \cdot 10^{-27} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$.

Но уже давно до этого были известны две другие фундаментальные постоянные, определяющие законы

природы: скорость света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с и гравитационная постоянная, входящая в закон тяготения, $G = 6,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{с}^2}$.

Присоединяя к этим двум (c и G) величину \hbar , получаем три величины, выраженные через три единицы измерения — грамм, сантиметр и секунда.

Но это значит, что можно найти теперь фундаментальную массу, длину и время: $m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar \cdot c/G}$, $l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar \cdot G/c^3}$, $t_{\text{Pl}} = \sqrt{G \cdot \hbar/c^5}$. Эти величины называют «планковскими». Их обозначения и числовые значения (см. Введение):

$$m_{\text{Pl}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ г}, \quad l_{\text{Pl}} = 1,5 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \\ t_{\text{Pl}} = 5 \cdot 10^{-44} \text{ с}.$$

Планковская масса оказывается огромной величиной в 10^{19} раз больше массы протона, в 10^{22} раз больше массы электрона!

Казалось бы, это свидетельствует о том, что тяготение не имеет ничего общего с теорией элементарных частиц. Но взаимоотношения между тяготением и частицами можно придать другую форму. Сила кулоновского электростатического притяжения электрона к протону равна $F_e = e^2/r^2$. Сила ньютоновского притяжения этих же двух частиц равна $F_g = Gm_e m_p / r^2$, где m_e — масса электрона, m_p — масса протона (не путать с m_{Pl} — планковской массой!). Зависимость от расстояния одинаковая. Значит, безразмерное отношение этих сил не зависит от расстояния.

Найдем это отношение:

$$\beta = \frac{F_g}{F_e} = \frac{Gm_e m_p}{e^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-8} \cdot 9 \cdot 10^{-28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-24}}{(4,8 \cdot 10^{-10})^2} \approx 4 \cdot 10^{-40}.$$

Отношение ничтожно мало, никакие спектроскопические измерения энергии атома водорода (да и любого другого атома или молекулы) не дадут возможности обнаружить гравитационные поправки к энергии.

Но наряду с этим практическим выводом малость β наводит на мысль, что гравитация не имеет отношения ни к электромагнитному, ни к другим видам (слабому, сильному) взаимодействия частиц.

Два аргумента, приведенные выше ($m_{\text{Pl}} \gg m_p$, m_e и $\beta \ll 1$) не независимы, они связаны между собой

простым арифметическим соотношением

$$\beta = \frac{Gm_e m_p}{e^2} = \frac{\hbar c}{e^2} \cdot \frac{m_e}{m_{p1}} \cdot \frac{m_p}{m_{p1}} = 137 \frac{m_e}{m_{p1}} \cdot \frac{m_p}{m_{p1}},$$

Малость β есть результат того, что в планковских единицах измерения масса электрона, как и масса протона, ничтожна:

$$m_e/m_{p1} = 10^{-22}, \quad m_p/m_{p1} = 10^{-19}.$$

Внимательный читатель уже обратил внимание на то, что весь параграф написан в сослагательном наклонении: «Казалось бы», что гравитация никак не связана с элементарными частицами. В действительности современная физика преодолевает эту пропасть. Сказанное выше надо рассматривать как указания на характер тех трудностей, которые при этом приходится преодолевать.

Тяготение как поле в плоском пространстве

Еще Эйнштейн в ходе конкретных расчетов рассматривал ситуацию, когда гравитационные эффекты, а следовательно, и кривизна пространства-времени, малы. В этом случае можно считать малым и отличие пространства-времени от плоского пространства-времени специальной теории относительности.

Эти малые отклонения можно характеризовать 10 величинами, функциями координат, которые играют роль потенциалов. Кривизна выражается через частные производные (см. Математическое дополнение, с. 201) этих 10 величин по времени и по пространственным координатам. Не случайно число потенциалов (10) совпадает с числом компонент тензора плотности энергии, импульса и напряжений вещества.

Ряд ученых развивали это направление. Оказалось, что можно построить теорию тяготения, очень похожую на теорию Максвелла. Отличие состоит в том, что

1) кванты свободно распространяющегося поля, *гравитоны*, имеют спин 2, в отличие от квантов электромагнитного поля, фотонов, спин которых равен 1.