



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-26

P2-97-26

В.Н.Стрельцов

О ВСЕ ФОТОНА

1997

*...закон постоянства скорости света в пустоте, представляющий одну из двух основных предпосылок специальной теории относительности, не может согласно общей теории относительности претендовать на неограниченную применимость [1]. ... этот результат исключает всеобщую применимость преобразований Лоренца [2].*

А.Эйнштейн

Согласно общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна скорость света зависит от гравитационного потенциала, т.е. утрачивает свойство инвариантности. С другой стороны, фотону приписывается гравитационная потенциальная энергия. Ранее было показано [3], что это приводит к серьезным трудностям и, в частности, прямо противоречит известным опытам по измерению гравитационного красного смещения.

Ниже мы обсудим эту проблему детальнее.

**Масса фотона.** Как известно, одной из основ ОТО является закон инерции энергии (ЗИЭ). Фактически на основании этого закона всякой энергии (в частности, световой) приписывается масса. «Луч света несет энергию. А энергия имеет массу. Но на всякую инертную массу поле тяготения оказывает воздействие, т.к. инертная и тяжелая массы эквивалентны. Луч света будет искривляться в поле тяготения точно так же, как искривляется траектория тела...» [4]. Иначе говоря, в ОТО фотон в гравитационном поле должен обладать (как и материальное тело) потенциальной энергией. Однако осознание того, что ЗИЭ противоречит требованию лоренц-ковариантности [5], ставит под сомнение предыдущие рассуждения. Напомним, что в специальной теории относительности масса является инвариантом (лоренцевым скаляром), а энергия — компонентой 4-вектора. Это наглядно демонстрирует известная формула Минковского для энергии любого физического объекта:

$$E = p^0 c = m u^0 c = m \gamma c^2. \quad (1)$$

Здесь  $p^0$  и  $u^0$  — временные компоненты 4-векторов энергии-импульса и 4-скорости,  $\gamma$  — лоренц-фактор. В случае света (фотона)  $\gamma = \infty$ . Поэтому, чтобы

обеспечить конечность  $E$ , необходимо допустить, что масса фотона  $m = 0$ . Но это означает, что свет тогда не должен испытывать действие гравитационного поля, т.е. приведенные выше соображения теряют смысл.

**Потенциальная энергия фотона.** Впрочем, если говорить строго, то в ОТО роль прежнего «гравитационного заряда» (массы) фактически берет на себя энергия. Действительно, например, для достаточно слабых полей тяготения метрический тензор  $g_{ik}$  может быть представлен в виде

$$g_{ik} = \eta_{ik} + h_{ik}. \quad (2)$$

Здесь  $\eta_{ik}$  — «постоянный» тензор Минковского,  $h_{ik}/2$  — собственно тензор гравитационного потенциала, причем  $h_{00} = -h_{\alpha\alpha} = 2\phi/c^2$ , где  $\phi$  — потенциал Ньютона. В результате для потенциальной энергии фотона в гравитационном поле будем иметь

$$\mathcal{E}_p = p_p^0 c = p_0^0 h^{00} c / 2 = \mathcal{E} \phi / c^2, \quad (3)$$

а для полной энергии —

$$\mathcal{E}_g = \mathcal{E} + \mathcal{E}_p = \mathcal{E} (1 + \phi/c^2). \quad (4)$$

Следует отметить, что с учетом квантового соотношения  $E = h\nu$  последнее выражение, очевидно, согласуется с формулой для частоты

$$\nu_g = \nu (1 + \phi/c^2) \quad (5)$$

света, излучаемого источником в гравитационном поле.

Хотя, таким образом, в ОТО фотон (как и материальное тело) обладает гравитационной потенциальной энергией, их поведение в поле тяготения существенно различается. Так, при падении тела в гравитационном поле<sup>1</sup> рост его отрицательной потенциальной энергии при постоянной полной ведет к соответствующему увеличению его кинетической энергии. В случае же фотона указанный рост потенциальной энергии ведет согласно (4) к уменьшению его полной энергии<sup>2</sup> (в принципе, вплоть до обращения ее в нуль, т.е. исчезновения фотона). Даже отбросив мысль о несохранении энергии, нам не избежать трудности с объяснением самого механизма взаимодействия. Действительно, если в случае фотона мы имеем передачу электромагнитной энергии гравитационному полю, то почему такая же передача не происходит, скажем, в случае электрона, окруженного виртуальными фотонами?

Еще более разительным оказывается поведение скорости фотона.

<sup>1</sup> Например, при его приближении к массивному телу, создающему это поле.

<sup>2</sup> Ср., однако, с [6], где говорится, «что фотон в гравитационном поле обладает «кинетической энергией»  $h\nu$  и «потенциальной энергией»  $h\nu\phi$  и их сумма остается постоянной».

Скорость фотона в гравитационном поле. Согласно ОТО закон распространения света описывается уравнением

$$ds^2 = 0 \quad (6)$$

для интервала; откуда для скорости света в гравитационном поле с потенциалом  $\phi$ , в частности, имеем (см., например, [7]):

$$c_g = c(1 + \phi/c^2). \quad (7)$$

Таким образом, скорость света в ОТО изменяется с изменением гравитационного потенциала.

Возвращаясь к рассмотренному примеру, отметим, что по мере приближения тела к источнику поля его скорость (из-за притяжения) возрастает, напротив, при удалении — уменьшается. В случае же фотона его скорость при падении, наоборот, уменьшается\*, а при удалении от источника поля — растет. Такое странное поведение напоминает скорее действие сил отталкивания, т.е. мы имеем здесь что-то вроде антигравитации.

В приложении указывается на еще одно внутреннее противоречие ОТО, связанное с двумя способами определения энергии фотона. Однако, как оказывается, самая серьезная трудность возникает в результате детального анализа опытов по наблюдению гравитационного красного смещения спектральных линий.

Опыты Паунда — Ребке — Снайдера [8,9] показали, что частота света при его распространении в поле тяжести не изменяется с изменением гравитационного потенциала. Это означает, в частности, что фотон, рожденный в месте с гравитационным потенциалом, величиной которого можно пренебречь, обладает частотой  $\nu$  большей, чем частота  $\nu_g$  фотона, рожденного в месте с гравитационным потенциалом  $\phi$ , на величину  $\Delta\nu = \nu\phi/c^2$ . Поскольку скорость прибывшего фотона определяется формулой (7), а его частота  $\nu$ , то на основании

$$c_g = \lambda_g \nu = \lambda\nu(1 + \phi/c^2) \quad (8)$$

для его длины волны найдем

$$\lambda_g = \lambda(1 + \phi/c^2). \quad (9)$$

Как видно, здесь мы имеем уменьшение длины волны, т.е. смещение в другую, фиолетовую часть спектра. Этот результат трудно согласовать с наблюдаемым красным смещением, а при учете принципа эквивалентности и с релятивистским эффектом Доплера [10]. С другой стороны, такое «нековариантное» воздействие гравитационного поля только на пространственную характеристику световой волны вряд ли поддается объяснению.

\*Появляется принципиальная возможность того, что материальное тело обгонит световой луч.

Как мы, надеюсь, показали, источником всех отмеченных трудностей является фактически (пред)положение о зависимости скорости света от гравитационного потенциала. Поэтому отказ от него автоматически ведет к устранению перечисленных трудностей, но подрывает, очевидно, саму основу ОТО.

Вместе с тем, именно зависимостью скорости света от гравитационного потенциала объясняется в настоящее время наблюдаемое отклонение света Солнцем (см., например, [7]). С учетом сказанного выше остается допустить, что это отклонение связано с влиянием атмосферы Солнца, обладающей эффективным показателем преломления  $n_c \approx 1 + 0,4 \cdot 10^{-5}$ .

**Резюме.** В ОТО на основе ЗИЭ роль прежнего «гравитационного заряда» (массы) приписывается энергии. В результате фотон (как и материальное тело) обладает гравитационной потенциальной энергией. Ее изменение, приводящее к изменению полной энергии фотона при его движении в поле тяготения, связано с изменением скорости света, которая в ОТО утрачивает свойства инварианта. Опыты по измерению гравитационного красного смещения с помощью эффекта Мессбауэра говорят, однако, о неизменности энергии (частоты) света при его распространении в поле тяготения. Тем самым ставится под сомнение справедливость и самих исходных посылок ОТО.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

##### (Противоречивость двух определений энергии фотона в ОТО)

Из формулы Минковского (4) для энергии любого физического объекта с учетом того, что в случае фотона  $m=0$  и  $\gamma=\infty$ , но  $m_\phi = m\gamma$  — конечная величина, имеем формулу Пуанкаре

$$\mathcal{E} = m_\phi c^2. \quad (П1)$$

Поскольку согласно (7) скорость света изменяется с изменением  $\phi$ , для полной энергии фотона в гравитационном поле получим

$$\mathcal{E}_1 = (1 + 4\phi/c^2)\mathcal{E}. \quad (П2)$$

Очевидно, что последнее выражение отличается от рассмотренного выше выражения (4):

$$\mathcal{E}_2 = (1 + \phi/c^2)\mathcal{E}.$$

#### Литература

1. Эйнштейн А. — Собр. научн. трудов. М.: Наука, 1965, т.1, с.568.
2. Там же, с.189.
3. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-96-375, Дубна, 1996.

4. Эйнштейн А., Инфельд Л. — Эволюция физики. М.: Наука, 1965, с.183.
5. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-95-294, Дубна, 1995.
6. Вейнберг С. — Гравитация и космология. М.: Мир, 1975, с.100.
7. Эйнштейн А. — Сущность теории относительности. М.: ИИЛ, 1955, с.84.
8. Pound R.W., Rebka G.A., Jr. — Phys. Rev. Lett., 1960, 7, p.337.
9. Pound R.W., Snider J.L. — Phys. Rev. Lett., 1965, 140B, p.788.
10. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-96-435, Дубна, 1996.