

УДК 535

В.И. ЛЕБЕДЕВ

СВЕТ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Проведен анализ исследований, посвященных влиянию гравитации на свет. Совокупность имеющихся экспериментальных данных свидетельствует о том, что гравитация изменяет только показатель преломления вакуума и не влияет на частоту света, распространяющегося в гравитационном поле.

1. Введение

В процессе преподавания оптики вопросы, связанные с влиянием гравитации на свет, относящиеся к общей теории относительности (ОТО), обычно не затрагивают. Это связано с противоречиями в трактовке экспериментов, посвященных влиянию гравитации на свет. Некоторые учебники и информация Интернета [1-3] при рассмотрении вопроса о влиянии гравитации на свет часто включают некорректные рассуждения, о "гравитационном замедлении времени", гравитационном сдвиге частоты фотонов и о фотоне как материальной частице, на которую воздействует гравитационное поле.

Все же ответы на вопросы о влиянии гравитации на свет по-видимому уже определены и их следует включать в учебные курсы физики. Некоторые задачи, здесь возникающие, оказываются посильными и для школьников.

В соответствии с ОТО зависимость показателя преломления вакуума n от гравитационного потенциала θ описывают простой формулой [4]:

$$n = 1 + 2 \frac{\theta}{c_0^2}, \quad (1)$$

c_0 – скорость света в вакууме при отсутствии гравитации.

Влияние гравитационного поля на показатель преломления вакуума (которое подтверждается опытом) делает не эквивалентным распространение света в равноускоренной системе отсчета и в неподвижной системе отсчета в однородном гравитационном поле. В первом случае скорость света будет равна c_0 , а во втором – определяться соотношением (1). То есть принцип эквивалентности в его сильной форме несправедлив.

Скорость света по определению равна произведению длины волны света на его частоту $c = \lambda \nu$, поэтому предположение об одновременном уменьшении и скорости света и частоты излучения на одну и ту же относительную величину в гравитационном поле приводит к противоречию. В оптике доказано, что длина волны света обратно пропорциональна показателю преломления среды. Таким образом, влияние гравитационного поля на свет должно проявляться в изменении фазовой скорости света и длины волны излучения. Частота электромагнитных колебаний при этом должна оставаться постоянной, точно так же, как в случае распространения света в диэлектрике.

2. Световой импульс в гравитационном поле

Суть процессов, происходящих со светом в гравитационном поле, можно понять рассматривая идеализированную физическую модель (рис. 1). Пусть между двумя идеальными бесконечными параллельными зеркалами, распо-

женными на расстоянии L друг от друга, циркулирует короткий световой лазерный импульс в виде гауссова пучка с энергией E . Световой импульс обходит такой резонатор за время $T = 2L/c$ вдоль оси перпендикулярной зеркалам. Мысленно поместим это устройство в однородное гравитационное поле, характеризующее ускорением свободного падения g , сила гравитационного притяжения которого направлена параллельно зеркалам. Возрастание гравитационного потенциала увеличивает оптическую длину резонатора nL . Это приведет к тому, что оптическое расстояние между зеркалами вдоль вертикальной координаты будет непрерывно изменяться по линейному закону. Этот эффект можно рассматривать как разъюстировку зеркал на малый угол $\varphi = L(n - 1)/l = (L/l)\theta/c^2 = 2Lg/c^2$. Поэтому импульс, циркулирующий между зеркалами, начнет непрерывно смещаться от первоначальной оси в направлении области с более высоким гравитационным потенциалом. У волнового вектора световой волны появиться вертикальная составляющая и связанный с ней поток энергии.

Легко рассчитать расстояния между точками последовательных отражений оси светового пучка от зеркал. Длины этих отрезков непрерывно возрастают со временем и образуют арифметическую прогрессию: $l_m = \varphi L + 4(m-1)\varphi L$, где $2m$ – общее число отражений импульса от зеркал за некоторый выбранный временной интервал t . Общее расстояние, на которое сместится импульс за время $t = Tm$ (в случае $t \gg T$) равно сумме членов арифметической прогрессии: $l = gt^2/2$. Скорость смещения – $dl/dt = gt$. Нетрудно заметить, что это обычные формулы механики для равноускоренного движения.

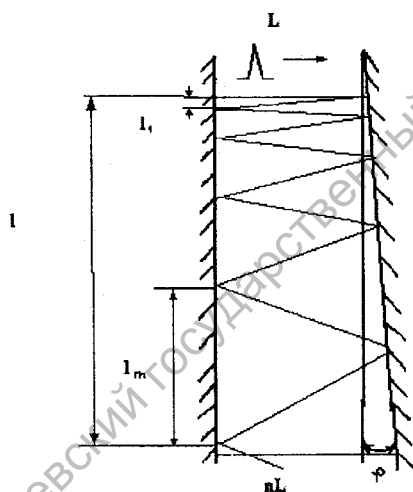


Рис. 1. Сбегание циркулирующего между зеркалами импульса в вертикальном направлении эквивалентно равноускоренному движению "частицы" под действием гравитационного поля

Таким образом, рассматриваемая модель позволяет в какой-то мере понять причины возникновения силы гравитации, используемой в механике, находясь в рамках гипотезы об электромагнитной природе материальных элементарных частиц. Гравитация не какая-то таинственная фундаментальная сила, а проявление свойства материальных тел. Показатель преломления вакуума в пространстве, окружающем материальное тело, убывает пропорционально расстоянию от него, вследствие чего и возникает сила притяжения, действующая на другие материальные тела.

Рассмотренная выше физическая модель – мазер. Изменение оптической длины резонатора, связанное с изменением гравитационного потенциала, приведет к соответствующей отстройке его резонансной длины волны. Следова-

тельно, резонансные частоты колебаний одного и того же лазера, помещенного на спутник, и на земной поверхности или на разных этажах здания будут различаться. В данном случае гравитация влияет не на частоту колебаний электромагнитной волны, а на резонансную длину волны прибора – лазера. В условиях резонанса – на двойной длине резонатора $2nL$, образованного двумя зеркалами, укладывается целое число длин волн λ : $nL = m \lambda/2$, где $m = 1, 2, 3 \dots$. Таким образом, если оптическая длина резонатора увеличивается вследствие изменения показателя преломления вакуума n в гравитационном поле, то его резонансная длина волны в гравитационном поле должна возрастать, а частота колебаний уменьшаться.

Резонансная частота лазера должна увеличиваться при запуске прибора в космос, где гравитационный потенциал меньше, чем на поверхности Земли. Сдвиг резонансной частоты резонатора лазера будет определяться просто различием гравитационных потенциалов на поверхности Земли и на спутнике в соответствии с формулой (1). Отличие частоты излучения лазера на спутнике от частоты такого же лазера, находящегося на поверхности Земли, подтверждено прямыми измерениями. Однако это явление не гравитационный сдвиг частоты света, а гравитационный сдвиг резонансной частоты прибора – лазера.

При движении с космической скоростью, равной $v = 8 \text{ км/с}$, относительный сдвиг частоты колебаний часов, находящихся на спутнике, по отношению к идеальному наблюдателю, находящемуся в центре Земли, равен $1/2(v/c)^2 = 3,56 \cdot 10^{-10}$. Это соответствует “замедлению времени” на спутнике 30 мкс в сутки.

Относительная разность резонансных частот для космического лазера по сравнению с земным должна быть равна $7 \cdot 10^{-10}$. Это соответствует “ускорению времени” на спутниковых часах на $86400 \cdot 7 \cdot 10^{-10} \text{ с} = 60 \text{ мкс}$ в сутки. По порядку величины эти значения совпадают с результатами наблюдений, на которые влияет множество дополнительных факторов, не учтенных в приведенных идеальных оценках. Конкретные измерения [5], показали, что из-за движения спутника с первой космической скоростью β на нем происходит релятивистское “замедление времени”, пропорциональное $\sqrt{1-\beta^2}$, с темпом 7 микросекунд в сутки. Уменьшение земного гравитационного потенциала на спутнике приводит к ускорению хода этих часов на 45 мксек в сутки. Суммарный эффект: “ход времени” на спутнике опережает Земное время на 38 мксек в сутки, причем, основной вклад в изменение частоты колебаний одинаковых мазеров, расположенных на Земле и в космосе, дает разность гравитационных потенциалов.

3. Отклонение светового луча и замедление скорости распространения света в поле тяготения Солнца

Для сферического тела, радиуса R и массой M гравитационный потенциал θ вблизи его поверхности равен: $\theta = GM/R = gR$, где g – ускорение свободного падения вблизи поверхности тела, G – гравитационная постоянная.

Задача 1. Используя формулу (1), определите гравитационную поправку $(n - 1)$ к показателю преломления вакуума вблизи поверхности Земли, связанную с ее гравитационным полем. Чему равна поправка к показателю преломления вакуума, создаваемая Солнцем на расстоянии, равном радиусу орбиты Земли?

$$\theta_3 = GM_3/R_3 = gR_3 = 6,24 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{сек}^2.$$

$$n - 1 = 6,26 \cdot 10^7 / (9 \cdot 10^{16}) = 6,9 \cdot 10^{-10}.$$

Поправка к показателю преломления вакуума, создаваемая гравитационным полем Солнца, на расстоянии, равном радиусу орбиты Земли $R_{\text{ор}}$, равна $\Delta n = 2GM_c / (c^2 R_{\text{ор}}) = 2 \cdot 10^{-8}$, что на два порядка превышает земную поправку. В межзвездном пространстве вдали от Солнца "истинное значение скорости света $- c_0$ ", будет превышать измеренное в земной лаборатории значение этой фундаментальной константы на приведенную выше величину.

Гравитационное поле массивного тела сферической формы создает в окружающем его пространстве изменение показателя преломления. Поэтому положение звезд, видимых вблизи массивного тела, будет отклоняться от истинного положения в сторону от центра тела.

Задача 2. Оцените угол отклонения луча, идущего от удаленной звезды и проходящего вблизи поверхности Солнца.

В соответствии с формулой (1) изменение показателя преломления вблизи поверхности Солнца Δn равно:

$$\Delta n = n - 1 = 2GM_c / (c^2 R_c) = 4,2 \cdot 10^{-6}.$$

Для оценки угла отклонения можно считать пространство, окружающее Солнце линзой. Фокусное расстояние двояковыпуклой линзы f определяется формулой геометрической оптики:

$$1/f = 2\Delta n/R_c.$$

Таким образом, луч, идущий от удаленной звезды параллельно оптической оси гравитационной линзы и проходящий вблизи поверхности Солнца, отклонится на угол, равный:

$$\varphi = R_c/f = 2\Delta n = 4GM_c / (c^2 R_c) = 1,7''.$$

Иногда задачу о гравитационном отклонении светового луча некорректно решают [2], в рамках механической модели, считая квант света частицей, обладающей массой. При этом угол отклонения частицы равен:

$$\varphi \cong \frac{|v_x|}{c} \cong \frac{2GM_c}{R_c c^2} = 0,87''.$$

Это значение оказывается в два раза меньше истинного значения. Однако порядок величины соответствует действительности. Это обстоятельство используется некоторыми авторами, как обоснование модели фотона как частицы, обладающей тяготеющей массой.

Измерения отклонения лучей проводят путем фотографирования звездного неба вблизи Солнца, через телескоп во время полного солнечного затмения, когда звезды на небе становятся видны днем. Затем эту фотографию сравнивают с фотографией этого же участка звездного неба, снятой ночью.

Согласно измерениям во время солнечных затмений 1947 и 1952 гг. отклонение луча в поле тяготения Солнца составляло $2 \pm 0,27$ и $1,68 \pm 0,1$ угловой секунды соответственно.

Еще более точные измерения были проведены в 80-е гг. с помощью радиотелескопа по гравитационному отклонению Солнцем сигналов от точечных

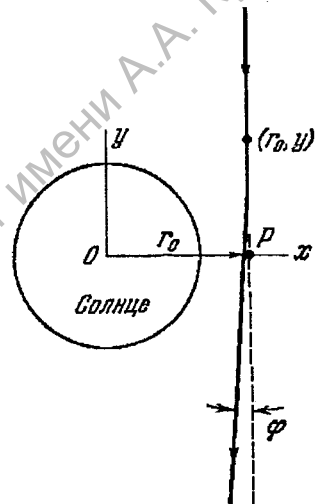


Рис. 2. Отклонение луча гравитационной линзой Солнца

космических радиоисточников, которые подтвердили формулу (1) с точностью в доли процента.

Возрастание показателя преломления космического вакуума вблизи Солнца регистрировали при радиолокации Солнца, а также Венеры и Меркурия. Этот эффект вызывает дополнительную задержку радиолокационных импульсов.

4. Роторные измерения не подтверждают существования сдвига частоты фотонов в силовом поле

Объяснение экспериментов [6] по измерению гравитационного сдвига частоты гамма-квантов при их "падении" в гравитационном поле Земли, приведенное их авторами, противоречит данным, приведенным в [7] и более точным роторным экспериментам.

В роторных экспериментах [8] источник высокомонохроматического мессбауэровского гамма-излучения помещали на конце быстро вращающегося ротора, а приемник (поглотитель гамма-квантов) – в центре ротора. При этом угол между векторами скорости источника и направлением наблюдения всегда равен 90° , что соответствует условию наблюдения поперечного эффекта Доплера.

По данным [8] измерения зависимости скорости счета гамма квантов, прошедших через поглотитель, от частоты вращения ротора с высокой точностью ($\sim 1\%$) подтверждают релятивистскую формулу специальной теории относительности для поперечного эффекта Доплера $(v_0 - v)/v = \frac{1}{2}\beta^2$.

Однако при этом возникает вопрос: почему большой силовой потенциал, в котором находятся атомы источника излучения, закрепленного на конце быстро вращающегося ротора, никак не влияет на наблюдаемый сдвиг частоты?

Излучение, испускаемое источником в направлении приемника, находящегося в центре быстро вращающегося ротора, должно преодолевать значительный силовой потенциал, эквивалентный однородному гравитационному полю. Этот потенциал определяется формулой:

$$\varphi = \frac{G\omega^2 R^3}{GR} = \frac{v^2}{c^2} c^2 = \beta^2 c^2,$$

здесь v – линейная скорость движения конца ротора. Для ротора радиусом 5 см и частоты его вращения 1400 Гц линейная скорость конца ротора равна 440 м/сек, а силовой потенциал $-1,9 \cdot 10^5$ м²/сек² в тысячи раз превышает гравитационный потенциал на поверхности Земли.

Силовой потенциал должен приводить к удвоенному по сравнению с доплеровским относительному сдвигу частоты того же знака $(v_0 - v)/v = \beta^2$. Таким образом, наблюдаемый сдвиг частоты в роторных экспериментах должен был бы в три раза превосходить измеренное значение, чего не наблюдалось.

Из роторных мессбауэровских экспериментов однозначно следует, что смещение частоты квантов, испускаемых и поглощаемых атомами, находящимися в силовом поле, отсутствует.

5. Заключение

Таким образом, совокупность имеющихся экспериментальных данных свидетельствует о том, что гравитация изменяет только показатель преломления вакуума (длину волны и фазовую скорость света) и не влияет на частоту

света, распространяющегося в гравитационном поле. Рассмотрение простой модели частицы, как светового импульса, циркулирующего между двумя параллельными зеркалами, позволяет понять причины аналогии между механическим и оптическим описанием гравитации. Гравитационное поле связано с градиентом показателя преломления вакуума в пространстве, окружающем массивные тела.

Все наблюдаемые экспериментально эффекты воздействия гравитации на свет могут быть объяснены зависимостью показателя преломления физического вакуума от гравитационного потенциала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Википедия (свободная энциклопедия). Гравитационное красное смещение. ru.wikipedia.org/wiki. 2008.
2. *Китель, Ч.* Берклевский курс физики / Ч. Китель, У. Найт, М. Рудерман. – М.: Наука, 1975. – Т. 1: Механика. – 480 с.
3. *Бердышев, С.Н.* Открытия и изобретения, о которых должен знать современный человек / С.Н. Бердышев. – М., 2002. – 150 с.
4. *Фок, В.А.* Теория пространства, времени и тяготения / В.А. Фок. – М., 1955. – 271 с.
5. Scientific American. Special issue – Time. 2002. Sept.
6. *Pound R.V.* Phys. Rev. Letters / R.V. Pound, G.A. Rebka. – 1960. – Vol. 4. 337.
7. *Egelstaff.* Phys.Rev. Lett / H.J. Hay [et al.] – 1960. – Vol. 4. – P. 165.
8. *Proc. Phys. Soc / D.C. Champney [et al.].* – 1965. – Vol. 85. – P. 583.

Поступила в редакцию 08.09.2008 г.