Гравитационное отклонение света

Владимир Браун

01.10.2020

В настоящее время нет общепринятого мнения о том, отклоняется ли свет в поле тяготения. Мнения разные, полярные – от того, что отклонения нет вообще, до того, что по теории относительности оно вдвое больше, чем по теории Ньютона.

Утверждение теории относительности нас не должно интересовать. Теория относительности вообще не может считаться теорией, по той причине, что в ней неверно трактуются понятия времени и пространства. Любому здравомыслящему человеку должно быть понятно, что эталоны физических величин не для того создаются чтобы их потом произвольным образом менять. Ни собственных времён, ни кривых пространств быть не может. Время одно – эталонное, так же как и евклидово пространство. В теории относительности эти простые истины нарушаются. Поэтому все выводы и утверждения этой "теории", по меньшей мере, необоснованы.

Мы не можем считать истиной и результат получаемый по теории тяготения Ньютона, по той простой причине, что о поведении света в поле тяготения она ничего не знает. Можно лишь задаться вопросом, насколько луч света отклоняется в поле тяготения в предположении, что свет ведёт себя в поле тяготения так же как вещество.
Ответ на этот вопрос, как будто бы, давно известен – с 1801 года, когда немецкий математик и астроном Иоганн Зольднер впервые рассчитал величину возможного отклонения. Но все варианты расчёта, которые я видел, переусложнены множеством второстепенных деталей скрывающих истинную суть явления, и неубедительны.
В данной статье представлен простой и ясный метод расчёта, который является побочным результатом моего обобщения Ньютоновой теории тяготения.

Ньютонов закон тяготения получается из общей теории как частный случай при следующих условиях:

$$-v_\infty^2(a+p)=2GM ,$$

$$L^2+v_\infty^2 ap=0 ,$$

где G – гравитационная постоянная,
M – масса центра тяготения, центрального тела,
L – удельный момент импульса – момент импульса приходящийся на единицу массы или момент скорости,
v_∞ – остаточная скорость тела – скорость, к которой стремится скорость тела при удалении тела на бесконечное расстояние от центра тяготения,
a и p – апоцентр и перицентр траектории тела, их расстояния от центра тяготения.

Таким образом в теории Ньютона появляются два чрезвычайно полезных соотношения:

$$v_\infty^2=-\frac{2GM}{a+p} ,$$

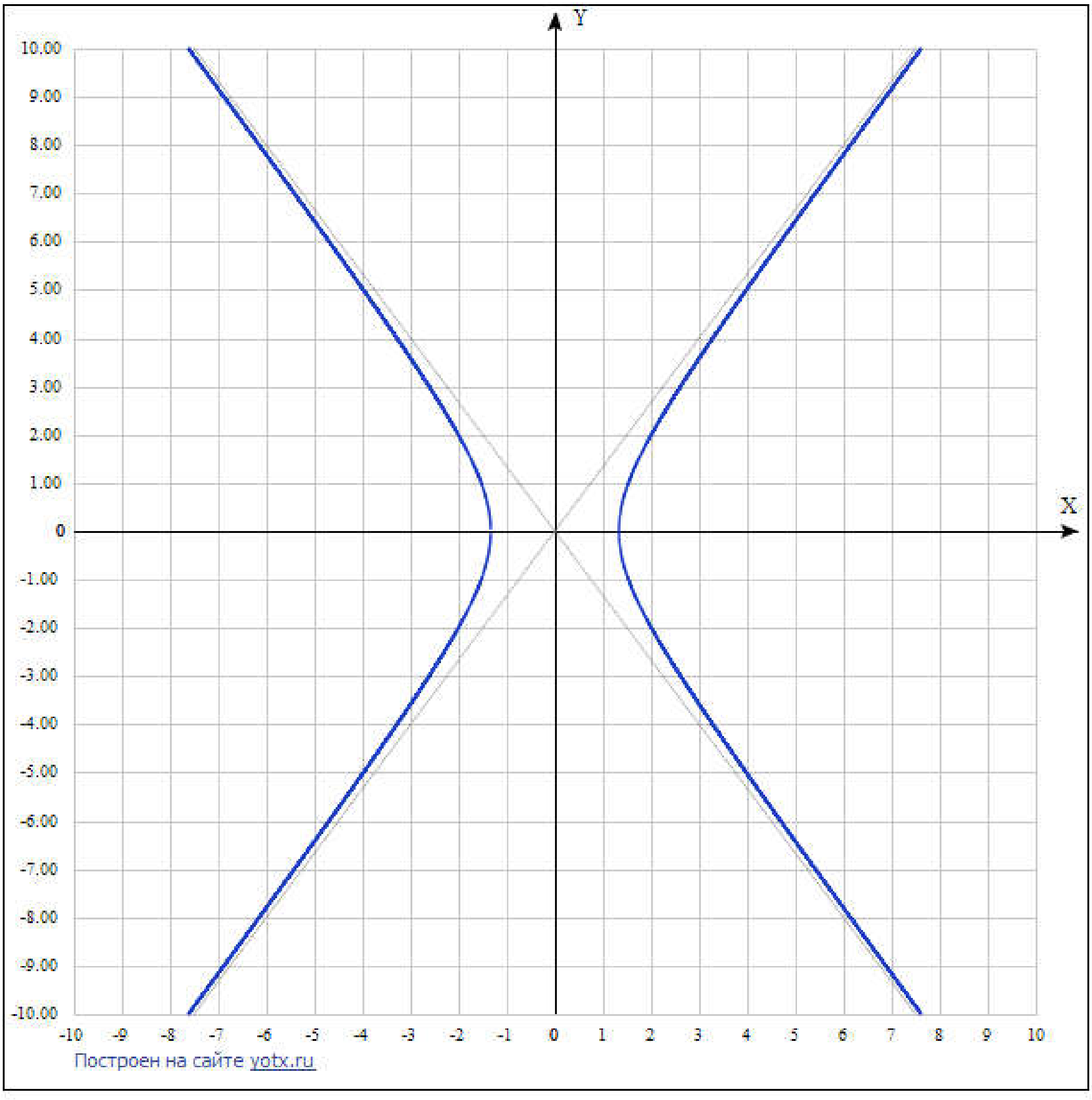
$$L^2=-v_\infty^2 ap .$$

Знаки "минус" здесь не должны смущать – квадрат остаточной скорости эллиптической скорости и значение апоцентра гиперболической траектории отрицательны. Соотношения же верны всегда, при любой кеплеровой траектории.

Обратимся к вычислению величины отклонения света в поле тяготения.

Начнём с того, что заметим, что скорость света, как скорость большая любой другой, заведомо гиперболическая, во всяком случае, в поле звёзд, планет и прочих спутников. Луч света в центральном поле тяготения космических тел движется по гиперболе.

Вдали от центра гипербола практически совпадает со своими асимптотами. Следовательно, угол изгиба ветви гиперболы – это угол между её асимптотами:



Асимптоты гиперболы, заданной в декартовой системе координат каноническим уравнением

$$\frac{x^2}{A^2} - \frac{y^2}{B^2} = 1,$$

имеют уравнения

$$y = \pm \frac{B}{A} x .$$

Из этих уравнений следует, что тангенс угла наклона асимптот к оси *y* равен

$$tg\,\alpha = \frac{A}{B},$$

и угол наклона асимптот к оси *y* равен

$$\alpha = \mathrm{arctg}\frac{A}{B}.$$

Угол между асимптотами равен удвоенному их углу с осью *y*:

$$\gamma = 2\,\mathrm{arctg}\frac{A}{B}.$$

Известно следующее соотношение между длинами полуосей гиперболы и её эксцентриситетом:

$$\frac{B^2}{A^2} = e^2 - 1.$$

Следовательно,

$$\frac{A}{B} = \frac{1}{\sqrt{e^2 - 1}},$$

и

$$\gamma = 2\,\mathrm{arctg}\frac{1}{\sqrt{e^2 - 1}}.$$

Вследствие большой величины эксцентриситета и малости угла отклонения, в случае траектории светового луча верно следующее приближённое равенство:

$$\gamma = \frac{2}{e}.$$

Равенство приближённое лишь с точки зрения математики, с точки зрения физики это равенство можно считать совершенно точным. Например, для луча света проходящего вблизи поверхности Солнца значения величины изгиба, вычисленные по точной и приближённой формулам, совпадают вплоть до 16-го знака после запятой.
Таким образом, угол изгиба гиперболической траектории луча света есть удвоенная величина обратная её эксцентриситету.

До сих пор мы имели дело с математикой. Физике отводилась лишь роль критерия выбора объекта – гиперболы, с малым углом изгиба. Обратимся теперь к физике явления. Зная, что угол изгиба гиперболы определяется её эксцентриситетом, остаётся ответить на вопрос: "каков эксцентриситет гиперболической траектории луча света?"

Эксцентриситет конического сечения, каковым является траектория тела в центральном поле тяготения, и, как мы здесь считаем, траектория луча света, равен

$$e = \frac{a - p}{a + p}.$$

Это тоже пока лишь математика. Связать это выражение с физикой, не просто с коническим сечением, а с физическими параметрами траектории движения тела или луча света, нам поможет приведённое выше соотношение:

$$v_\infty^2 = -\frac{2GM}{a + p}.$$

Выразив из него апоцентр траектории, a, через остальные параметры траектории,

$$a = -p - \frac{2GM}{v_\infty^2},$$

и подставив его в выражение для эксцентриситета, получим:

$$e = \frac{v_\infty^2 p}{GM} + 1.$$

Тем самым мы выразили эксцентриситет произвольной кеплеровой траектории через остаточную скорость и остальные параметры траектории – массу центра тяготения и перицентр траектории (расстояния от центра тяготения до ближайшей к нему точки траектории, которое в случае, когда речь идёт о гравитационном отклонении света, почему-то любят называть прицельным параметром).

Эксцентриситет можно выразить и через скорость в перицентре траектории. Для этого можно привлечь "теорему Пифагора" кеплерового движения:

$$v^2 = v_{\text{esc}}^2 + v_\infty^2,$$

где v_{esc}^2 – квадрат скорости убегания (параболической скорости) равный

$$v_{\text{esc}}^2 = \frac{2GM}{r}.$$

Из этой "теоремы" мы получаем для остаточной скорости выражение

$$v_\infty^2 = v^2 - \frac{2GM}{r},$$

которое возьмём в точке перицентра, $r = p$:

$$v_\infty^2 = v_p^2 - \frac{2GM}{p},$$

и подставим в полученное выше выражение для эксцентриситета. Получим:

$$e = \frac{v_p^2 p}{GM} - 1,$$

где v_p^2 – квадрат скорости в перицентре (перигелии, перигее).

Таким образом, мы получили для эксцентриситета кеплеровой траектории два похожих выражения – с остаточной скоростью и со скоростью в перицентре:

$$e = \frac{v_\infty^2 p}{GM} + 1, \quad e = \frac{v_p^2 p}{GM} - 1,$$

любое из которых можно использовать для вычисления угла отклонения света. Считая, однако, что скорость света, при огромной своей величине, относительно мало изменяется в поле тяготения звёзд, и тем более в поле планет, и полагая константу c средним значением скорости света, мы можем для света заменить эти два точных равенства одним приближённым:

$$e = \frac{c^2 p}{GM}.$$

Для угла отклонения света в поле тяготения получим, соответственно, приближённую формулу

$$\gamma = \frac{2GM}{c^2 p},$$

(где p – прицельный параметр, перицентр траектории), к которой обычно и приводят вычисления гравитационного отклонения света по теории Ньютона.

Полюбопытствуем теперь сначала, каким может быть эксцентриситет луча света. Кроме скорости эксцентриситет зависит также от массы центра тяготения и расстояния перицентра. Сравним эксцентриситет лучей проходящих вблизи поверхности Солнца и вблизи поверхности Земли. Имеем:

G = 6,67384e-11 м³/с²/кг – гравитационная постоянная,
c = 299792458 м/с – скорость света,
M = 1,9891e30 кг – масса Солнца,
p = 6,9551e8 м – перигелий траектории луча света, радиус Солнца.

Подставив все значения в формулу, получаем для эксцентриситета луча света вблизи поверхности Солнца значение

$$e = 470882.$$

В случае Земли имеем:

M = 5,9726e24 кг – масса Земли,
p = 6371000 м – перигей траектории луча света, радиус Земли.

Произведя вычисление, получим для эксцентриситета луча света проходящего вблизи поверхности Земли огромную величину, в 3050 раз большую, чем для луча света вблизи поверхности Солнца,

$$e = 1436513760.$$

Поскольку, как мы выяснили, угол отклонения света в поле тяготения обратно пропорционален эксцентриситету, то из этого мы заключаем, что отклонение света вблизи поверхности Земли в 3050 раз меньше, чем вблизи поверхности Солнца.

Вычислим теперь величину отклонения луча света вблизи поверхности Солнца.

$$\gamma = \frac{2}{e} = \frac{2}{470882} = 0{,}0000042473 \text{ рад} = 0{,}876''.$$

Для Земли получается в 3050 раз меньшее значение, $\gamma = 0{,}000287''$.

Эксцентриситет и отклонение луча можно посчитать и по точным формулам.
В случае отклонения в поле Земли это сделать совсем просто. В случае Земли точная формула эксцентриситета со скоростью в перицентре (перигее),

$$e = \frac{v_p^2 p}{GM} - 1,$$

отличается от приближённой формулы,

$$e = \frac{c^2 p}{GM},$$

лишь вычитанием единички, так как в данном случае скорость света в перигее и есть скорость света, c, и $v_p^2 = c^2$.

Таким образом, точное значение эксцентриситета отличается от приближённого лишь на единицу:

$$e = 1436513759,$$

что при почти полуторамиллиардной величине практически ничего не значит.

В случае отклонения в поле Солнца, дело не совсем такое простое, как в случае Земли. Мы не знаем ни скорости света в перигелии траектории луча, на поверхности Солнца, ни остаточную скорость света в поле Солнца, на бесконечном расстоянии от него. Но эти величины можно вычислить, воспользовавшись упомянутой выше "теоремой" кеплерового движения.

Расчёт показывает, что скорость света на Солнце на 633,491 м/с больше, чем скорость света на Земле, c. Такое относительно небольшое изменение скорости света приводит лишь к небольшому изменению эксцентриситета луча – так же как и в случае Земли на единицу, но на этот раз в сторону увеличения:

$$e = 470883,$$

и практически никак не сказывается на величине отклонения луча:

$$\gamma = 0{,}876''.$$

Напомню, что все расчёты сделаны в предположении, что движение света в поле тяготения подчиняется тем же закономерностям, что и движение вещества. Истинная закономерность движения света в поле тяготения неизвестна.