

Вадим Дунаев

## Исправление ошибки Рёмера

Конечность скорости света впервые установил в 1676 г. датский астроном Олаф Рёмер вопреки укоренившемуся тогда мнению, что свет распространяется мгновенно. А именно, он определил, что свет преодолевает расстояние, равное диаметру орбиты Земли, примерно за 22 минуты. Современное значение — примерно 16,67 минуты; радиус (половину диаметра) орбиты Земли свет проходит за 8,33 мин. Таким образом, ошибка Рёмера составляет более 30%, что и по тогдашним меркам слишком много. Это тем более удивительно, что интервалы времени измерялись весьма авторитетным астрономом с достаточно высокой точностью — до секунд.

Заметим, Рёмер официально не публиковал собственно значение скорости света. Возможно, потому что не считал величину радиуса орбиты Земли (астрономической единицы), вычисленную Д. Кассини (140 млн км), достаточно точной. Если использовать данные Кассини, то скорость света по Рёмеру получается равной примерно 212 000 км/с, а для современного значения астрономической единицы (около 150 млн км) — 227 000 км/с. Таким образом, в любом случае погрешность определения скорости света (современное значение — 299 792,458 км/с, то есть около 300 000 км/с) составляет чрезмерно большую величину — примерно 25%. Возможно также, что Рёмер не указал значение скорости света потому, что в те времена практически важнее было рассчитать временные задержки выходов Ио, спутника Юпитера, из тени последнего. Ведь с подачи Галилео Галилея Юпитер и его первый спутник, то появляющийся, то скрывающийся, можно было рассматривать как достаточно точные “небесные часы”, очень важные для мореплавателей. Однако период затмений Ио нуждался в поправках, зависящих от взаимного положения Юпитера и Земли. Вычислением этой поправки и занимался Рёмер, чтобы составить таблицы данных, пригодных для морской навигации, при этом значение скорости света — побочный, а не целевой, результат его работы.

Я заинтересовался, почему Рёмер ошибся? Интерес усилился, когда узнал, что И. Ньютон в 1686 г. в первом издании своих “Математических начал натуральной философии” указал, как и Рёмер, что свет проходит две астрономических единицы (диаметр земной орбиты) за 22 минуты, а затем уже в 1704 г. в “Оптике” сообщил, что свет проходит одну астрономическую единицу за 7 или 8 минут (близко к современному значению). Как он это вычислил? Вскоре, в 1726 — 1728 г.г., Д. Брайль установил, что свет проходит от Солнца до Земли за 8 минут 13 секунд, что соответствует его скорости 304 000 км/с. Далее последовала череда различных опытов по уточнению величины скорости света, приближающих её к современному значению. Кроме того, появление в 1730-х годах точных механических хронометров снизило актуальность “небесных часов”. Видимо, это и объясняет отсутствие в течение более трёх столетий интереса к причинам огромной ошибки Рёмера. Наконец, мой интерес к рассматриваемой здесь теме достиг максимума, когда я узнал, что недавно (2018 г.) Юрий Гужеля (<http://round-the-world.org/?p=4136>) проанализировал табличные данные о затмениях спутника Юпитера в период 1994 — 1995 г.г. и пришёл к выводу, что Рёмер не ошибся! А отличие полученной из его опытов скорости света от современного значения Ю. Гужеля пытался объяснить неоднородностью гравитационного поля Солнца, то есть различиями гравитации около Юпитера и вблизи Земли. На мой взгляд, это слишком замысловатая гипотеза; всё можно объяснить более простыми средствами, как мы увидим далее.

И вот, я решил провести собственное расследование. И начать его следует с анализа схемы опыта Рёмера, публикаций о которой очень много, хотя сам Рёмер изложил её кратко лишь в самых общих чертах, так сказать, на популярном уровне. Тем не менее, здесь я напомним о ней.

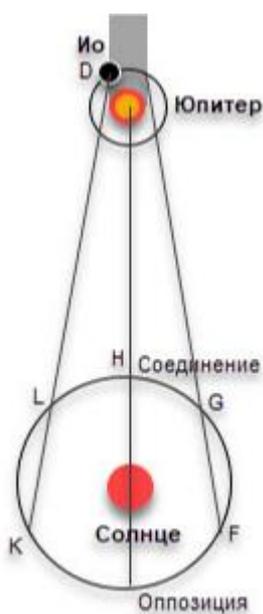


Рис. 1

На рис.1 показана схема, аналогичная приведённой Рёмером в его статье 1676 г. Пусть с Земли в точке L наблюдается Ио в момент выхода из тени в точке D. Спустя период обращения около Юпитера (примерно 1,77 земных суток) Ио снова окажется в точке D, но будет видна с Земли, находящейся уже в точке K. Поскольку отражённому от Ио свету требуется пройти дополнительное расстояние LK, то выход из тени будет наблюдаться позже. Разумеется, это справедливо, если скорость света конечна.

Итак, Рёмер наблюдал затмения Ио — спутника Юпитера, измеряя интервал времени между выходами первой из тени второго — период обращения. Истинный период (примерно 1,77 суток) измеряется, когда Земля и Юпитер находятся на минимальном или максимальном удалении друг от друга. В этих положениях, называемых ещё соответственно соединением и оппозицией (противостоянием), планеты движутся параллельно. Рёмер заметил, что по мере удаления Земли от Юпитера наблюдаемый выход Ио из тени запаздывает, то есть как будто период её обращения увеличивается по сравнению с истинным значением. В оппозиции период становится таким же, что и в соединении. На обратном пути Земли от оппозиции к соединению с Юпитером наблюдаемый выход

Ио из тени происходит с некоторым опережением, как будто период обращения сокращается. Максимальное запаздывание (опережение) составляет приблизительно 15 секунд. Это происходит в точках земной орбиты, расположенных на перпендикуляре к линии противостояния, проведённом через Солнце.

Другими словами, если мы зафиксировали момент  $t$  выхода Ио из тени, то следующий её выход произойдёт не в момент  $t + T$ , где  $T$  — истинный период обращения Ио около Юпитера, а в момент  $t + T + \Delta T$ , где  $\Delta T$  — запаздывание прихода отражённого от Ио света. Очевидно, если просуммировать все указанные запаздывания на пути Земли от точки соединения к оппозиции, то получим общее время, необходимое свету для преодоления расстояния, равное двум астрономическим единицам (или диаметру орбиты Земли). Такова идея опыта Рёмера. Всем нам не известен доподлинно и в деталях метод его расчётов, но мы можем сделать некоторые предположения. Прежде всего заметим, что на пути Земли между соединением и оппозицией за полгода наблюдается 103 затмения Ио. Наверяд ли Рёмер измерял запаздывание каждого из них. Видимо, он использовал ограниченные по объёму данные, применяя к ним какую-то процедуру осреднения и аппроксимации. Мне кажется, что такой подход и дал в результате слишком большую итоговую погрешность.

Здесь я приведу два простых метода расчёта скорости света на основе эксперимента Рёмера. Погрешности этих методов малы и обусловлены некоторым упрощением схемы, а также округлением данных. Упрощение схемы заключается в том, что вместо расстояния между Землёй и Ио мы будем рассматривать расстояние между Землёй и Юпитером, который к тому же будем считать неподвижным. Первое упрощение оправдывается тем, что радиус орбиты Ио меньше радиуса орбиты Юпитера более, чем в 1857 раз, а второе — тем, что период Юпитера почти в 12 раз больше земного, так что за полгода угловое смещение Юпитера составит всего лишь около 15 градусов.

Расстояние  $r$  между Землёй и Юпитером вычисляется по теореме косинусов (рис.2):

$$r = \sqrt{R_{\text{Ю}}^2 - 2R_{\text{Ю}}R_{\text{З}} \cos(\varphi) + R_{\text{З}}^2}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{Ю}}$ ,  $R_{\text{З}}$  — радиусы орбит Юпитера и Земли соответственно;

$\varphi$  — угол между направлениями от Солнца на Землю и Юпитер.

В астрономических единицах измерения  $R_3=1$ ,  $R_{Ю}=5.2$ .

Пусть  $r_i$  — расстояние между Землёй и Юпитером в момент  $i$ -го ( $i=0, 1, 2, \dots$ ) выхода Ио из тени Юпитера; 0-й выход наблюдается в положении соединения, то есть на минимальном расстоянии до Юпитера. Выражение для  $r_i$  получается из (1) заменой угла  $\varphi$  на величину  $2\pi i/T_3$ , где  $T$  — истинный период обращения Ио около Юпитера, а  $T_3$  — период обращения Земли;  $2\pi T_i/T_3 = 2\pi i(1,77/365,25) = 0,0304i$ .

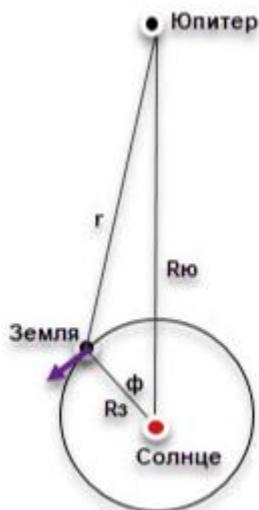


Рис. 2

Запаздывание  $\Delta T_i$   $i$ -го выхода Ио из тени определяется следующим выражением:

$$\Delta T_i = (r_i - r_{i-1})/c, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света.

Скорость света пока нам неизвестна, но  $\Delta T_i$  как функция  $i$  аналогична разности расстояний  $r_i - r_{i-1}$  как функции от  $i$ , поэтому перейдём от выражения (2) посредством простого изменения масштаба к следующему:

$$\Delta T_i = (\max(\Delta T_i)/\max(r_i - r_{i-1})) (r_i - r_{i-1}), \quad (3)$$

где  $\max(\Delta T_i)$  — максимальное значение запаздывания  $\Delta T_i$ , равное по наблюдениям Рёмера 15 секундам;

$\max(r_i - r_{i-1})$  — максимальное значение разности расстояний.

Максимальные значения запаздывания и разности расстояний получаются при  $i=52$ , когда Земля находится приблизительно на перпендикуляре к линии противостояния, проходящем через Солнце. Теперь всё готово, чтобы вычислить суммарное запаздывание, обусловленное удалением Земли от Юпитера на диаметр орбиты Земли (2 астрономических единицы), или же сразу вычислить скорость света.

Для вычисления суммарного запаздывания достаточно проинтегрировать (например, с помощью калькулятора) выражение (3) по  $i$  в пределах от 1 до 103 ( $0,5T_3/T=182,6/1,77=103,2$ ) — столько затмений Ио наблюдается за полгода между соединением и оппозицией, в течение которого земля удаляется от Юпитера на диаметр своей орбиты, то есть на 2 астрономических единицы, или примерно 300 млн км. В результате получается суммарная временная задержка  $\Delta T = 999,75$  секунд (или 16,66 минут). Отсюда получаем значение скорости света  $c = 2R_3/\Delta T = 300\,000\,000/999,75 = 300\,075$  км/с.

Сравнивая выражения (2) и (3), не трудно заметить, что

$$c = \max(r_i - r_{i-1})/\max(\Delta T_i).$$

Помятуя, что максимумы достигаются при  $i = 52$ , получаем  $c = 0,00199$  астрономических единиц в секунду, или 298 500 км/с. Отсюда следует, что свет преодолевает расстояние от Солнца до Земли (одну астрономическую единицу) за  $1/0,00199/60 = 8,38$  минут.

Заметим, что для получения наших целевых результатов необходимо лишь одно единственное экспериментальное измерение времени запаздывания выхода спутника Юпитера из тени, причём совсем не обязательно максимальное, которое использовалось в нашем расследовании.

Итак, при использовании упрощённой схемы и округлённых данных, мы получили довольно неплохие по точности результаты, которые Рёмер упустил. Тем не менее, он вплотную подошёл к открытию эффекта, который был обнаружен спустя 166 лет К. Доплером. Так, если обе части равенства (2) поделить на истинный период Ио  $T$ , то получим приближённую формулу Доплера:

$$\Delta T_i / T = ((r_i - r_{i-1}) / T) / c = V_r / c, \quad (4)$$

где  $V_r$  — радиальная скорость Земли относительно Юпитера.

Когда Земля находится на перпендикуляре к линии противостояния, проходящем через Солнце, радиальная скорость  $V_r$  приблизительно равна орбитальной скорости Земли — 29,78 км/с, а  $\Delta T_i = 15$  секунд. Тогда из (4) находим значение скорости света  $c = 303441$  км/с, что с учётом наших допущений можно считать довольно хорошим результатом (погрешность менее 1,5%). Если же ещё учесть угол между направлением на Юпитер и вектором скорости Земли в указанном положении, равный приблизительно 11 градусов, то получится значение скорости света, равное приблизительно 298 000 км/с.

Таким образом, следует признать, что Рёмер ошибся (хотя это и не умаляет его заслуг перед наукой), однако его ошибка могла быть исправлена ещё при его жизни, то есть до 1710 г. Ньютон как-то это отчасти сделал, но если бы он, или кто-то другой из его современников, занялся этим более серьёзно, то, быть может, мы раньше, или глубже, проникли в механику относительного движения тел и света.

На связь между опытом Рёмера и эффектом Доплера впервые, как мне кажется, обратил внимание Владимир Секерин (книга “Теория относительности — мистификация XX века”, 2007 г.). Дополнительно к этому я обращаю ваше внимание на классический опыт А. Физо, проведённый с целью определения скорости света в земных условиях в 1849, то есть спустя несколько лет после обоснования своих опытов К. Доплером. Схема опыта Физо идейно очень близка схеме опыта Рёмера. Но все эти схемы легко описываются в рамках одной и той же “теории” — кинематической схемы Доплера.