

Определение скорости света по таблицам Рёмера

1. Аннотация

В данной статье выполнены расчёты скорости света методом Рёмера на основе таблицы затмений спутника Юпитера Ио 1676 года, которой пользовался Рёмер.

В результате этих расчётов получено значение скорости света 66 000 км/с, далёкое от общепринятого значения скорости света (300 000 км/с).

Также выполнены расчёты скорости света методом Рёмера на основе таблиц 1672, 1673, 1675 годов. Среднее значение скорости света для всех расчетов составило 45 500 км/с.

Это существенное расхождение в скоростях света (45 500 км/с. и 300 000 км/с) можно объяснить различными параметрами среды, в которой распространяется свет, у поверхности Земли и на значительном удалении от поверхности Земли и Солнца.

Содержание

1. Аннотация	
2. Введение	
3. Результаты исследования	
3.1. Метод Рёмера.....	
3.2. Определение скорости света по таблице затмений спутника 1676 года.....	
3.3. Определение скорости света по таблицам 1672, 1673, 1675, 1677 годов.....	
3.3.1.Определение скорости света по таблице 1672 года.....	
3.3.2. Определение скорости света по таблице 1673 года.....	
3.3.3. Определение скорости света по таблице 1675 года.....	
3.3.4.Определение скорости света по таблице 1677 года.....	
3.4. Результаты измерений скорости света по таблицам 1672,1673,1675,1676,1677 г.....	
4. Выводы	
5. Литература	

2. Введение

Примерно такое же значение скорости света (66 000 км/с, что соответствует времени преодоления светом диаметра земной орбиты за 75 минут) в 1676 году должен был получить и Рёмер, поскольку он также пользовался табличными данными затмений спутника Юпитера Ио 1676 года. Однако в научно популярной литературе [1, 2, 4, 5, 6, 7] и в Википедии указано, что согласно Рёмеру, свет преодолевает расстояние равное диаметру земной орбиты, за 22 минуты. При этом там же в Википедии указано, что Кассини раньше Рёмера (в 1672 году) сделал примерно такую же оценку скорости света (21 минута 50 секунд) Так что 22 минуты – это, по-видимому,

оценка скорости света Кассини, а не Рёмера. В то время как результат измерения скорости света полученный Рёмером, умалчивается.

Если принять радиус земной орбиты, согласно измерениям Д. Кассини, равным 140 млн. км., то скорость света соответствующая 22 минутам, составит 212 000 км/с.

Если же взять современное значение астрономической единицы 149,6 млн. км., то скорость света составит: 227 000 км/с.

Согласно современным представлениям свету для преодоления диаметра земной орбиты требуется 16 минут 38 секунд, что соответствует скорости света 300 000 км/с.

В справочниках и учебных пособиях значение скорости света (227 000 км/с.) принято замалчивать. Там просто утверждают, что Рёмер получил значение скорости света примерно равное 300 000 км/с. Хотя примерного равенства здесь не наблюдается, а имеет место существенное расхождение величин.

Что касается величины скорости света, полученной ниже, с использованием таблицы затмений спутника Юпитера Ио 1676 года (66 000 км/с.), то это значение вообще не упоминается ни в какой литературе. Не упоминается, видимо, по той причине, что его никак нельзя приравнять к 300 000 км/с.

По счастливой случайности таблица затмений спутника Юпитера Ио, которой пользовался Рёмер при определении скорости света, сохранились и приведена в Википедии, см. таблицу 1:

The image shows two pages of handwritten astronomical data. The left page is titled 'Observationes Tabula' and contains data for the years 1673 and 1677, including dates like 'Martij 10', 'Julij 25', 'Sept 12', 'Apr 14', and 'Dec 27'. The right page is titled 'Observationes Tabula' and contains data for the years 1673, 1677, and 1678, including dates like 'Oct 22', 'No. 26', 'Martij 19', 'Apr 27', 'May 4', 'Oct 18', 'Jan 3', 'Jan 10', 'Jan 12', 'Feb 11', 'Feb 20', 'Martij 7', 'Martij 14', 'Martij 23', 'Apr 6', 'Apr 13', 'Apr 22', 'Apr 29', 'Nov 23', 'Feb 4', 'Feb 6', 'Feb 12', 'Feb 27', 'Mar 1', 'Mar 15', 'Mar 17', 'Mar 24', 'Apr 18', 'Apr 25', 'May 11', 'May 18', 'Aug 4', 'Oct 17', 'Nov 2', 'Dec 31', '1678', 'Jul 20', 'Jul 27', 'Oct 29', '1676', 'May 12', 'Jul 13', 'Aug 7', 'Aug 14', 'Aug 23', 'Nov 11', '1677', 'Jul 9', 'Jul 16', 'Jul 23', 'Jul 30', 'Aug 6', 'Aug 13', 'Aug 20', 'Aug 27', 'Sep 3', 'Sep 10', 'Sep 17', 'Sep 24', 'Oct 1', 'Oct 8', 'Oct 15', 'Oct 22', 'Oct 29', 'Nov 5', 'Nov 12', 'Nov 19', 'Nov 26', 'Dec 3', 'Dec 10', 'Dec 17', 'Dec 24', '1678', 'Jan 6'.

Таблица 1.

Пользуясь этой таблицей и методом Рёмера, изложенным в первой публикации (Л 1), можно повторить вычисления Рёмера и восстановить истину.

3. Результаты исследования

3.1. Метод Рёмера

Для знакомства с методом Рёмера, приведём отрывок из его первого сообщения (1676 г.) [1]. Рисунок 1 во всех существенных деталях соответствует рисунку, приведенному в первом сообщении Рёмера.

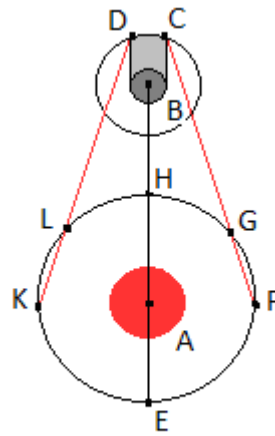


Рис. 1

«Пусть, A (см. Рис.1) будет Солнце, B – Юпитер, C – первый спутник Юпитера, который погружается в тень планеты; он появляется из неё в точке D ; пусть, $EFGHLK$ – положение Земли на различных расстояниях от Юпитера.

Теперь предположим, что с Земли, находящейся в точке L , виден первый спутник в момент его появления из тени в точке D ; примерно 42,5 часа спустя (то есть, после одного оборота этого спутника) с Земли, находящейся в точке K , виден спутник, возвратившийся в точку D .

Ясно, что, если свету требуется время, чтобы пройти расстояние LK , спутник будет виден возвратившимся в точку D позже, чем если бы Земля по прежнему находилась в точке L »

Отсюда уже видно, что расчёт Рёмера заключался в следующем:

- определялось время запаздывания появления спутника из тени Δt ;
- определялся дополнительный путь, пройденный светом, в первом приближении, это хорда

LK ;

- и определялась скорость света c из выражения:

$$c = \frac{LK}{\Delta t} \quad (1)$$

Из схемы (рис. 1) также видно, что скорость света можно определять и на участке пути FG , по времени опережения погружения спутника в тень Юпитера.

Для того чтобы определить время запаздывания появления спутника из тени, необходимо знать истинный период обращения спутника, который, согласно Рёмеру, равен периоду обращения, измеренному во время противостояния, когда Земля и Юпитер движутся параллельно друг другу.

К сожалению, Рёмер не привёл подробных расчётов истинного периода обращения спутника Ио, относительно тени Юпитера, и не привёл расчёта времени запаздывания выхода из тени спутника после n -го количества оборотов. Кроме того, недостатком схемы, представленной на рис.1, является то, что на ней не отражено перемещение Юпитера за время перемещения Земли из точки L в точку K и из точки F в точку G . Между тем, окружная скорость Юпитера составляет примерно 44% от окружной скорости Земли и поэтому пренебрегать перемещением Юпитера нельзя. Нельзя также не учитывать тот факт, что и во время противостояния, когда Земля и Юпитер движутся параллельно друг другу, расстояние между ними всё же изменяется, что

осложняет вычисление истинного периода обращения спутника относительно тени Юпитера. То есть, схема представленная на рисунке 1, не годится для проведения точных расчётов. По-видимому, Рёмер привёл эту схему лишь для пояснения принципа расчёта, а при выполнении расчётов пользовался более подробной схемой.

3.2. Определение скорости света на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1676 года

Выпишем из таблицы Рёмера (таблица 1) затмения спутника Юпитера Ио 1676 года и добавим в неё значения расстояний от Земли до Юпитера, найденные по программе Stellarium 0.13.3., см. таблицу 2

1676 год	
Погружение	Появление
дата, часы, минуты, секунды, расстояние	дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 4 Июля 1676 года	
12 Мая 14.39.42; 4,594 А.е.	7 Августа 9.49.50; 4,249 А.е.
13 Июня 10.56.11; 4,241 А.е.	14 Августа 11.45.55; 4,310 А.е.
	23 Августа 8.11.13.
	9 Ноября 5.45.35; 5,520 А.е.

Таблица 2.

Расчётная схема изображена на рисунке 2

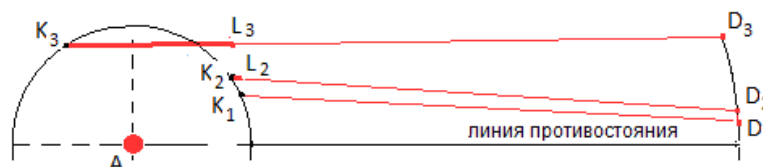


Рис. 2

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

K_1, K_2, K_3 - точки наблюдения на земной орбите за появлением из тени Юпитера спутника Ио;

D_1, D_2, D_3 - точки, обозначающие спутник Ио, появляющийся из тени Юпитера;

K_3D_3 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_3 , после заключительного появления спутника на измерительном участке 9 Ноября 1676 года, или расстояние от Земли до спутника 9 Ноября 1676 года;

K_1D_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_1 , 7 Августа 1676 года, или расстояние от Земли до спутника 7 Августа 1676 года;

K_2D_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_2 , 14 Августа 1676 года, или расстояние от Земли до спутника 14 Августа 1676 года;

K_2L_2 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 7 по 14 Августа (за четыре обращения спутника);

$$K_2 L_2 = K_2 D_2 - K_1 D_1$$

$K_3 L_3$ - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 7 Августа по 9 Ноября 1676 года (за 53 обращения спутника). Это измерительный участок, на котором определяется скорость света.

$$K_3 L_3 = K_3 D_3 - K_1 D_1$$

В дальнейшем, при проведении расчётов мы будем пользоваться расстояниями от Земли до Юпитера, вместо расстояний от Земли до спутника Ио, появляющегося из тени Юпитера или погружающегося в тень. Это допустимо, поскольку в расчётах учитывается величина изменения расстояния, а не величина расстояния.

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени Юпитера воспользуемся наблюдениями за появлением спутника от 7 и 14 Августа 1676 года, см. таблицу 2.

7 Августа 1676 года появление спутника из тени Юпитера состоялось в 9 часов 49 минут 50 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера, составляло: 4,249 А.е.

14 Августа 1676 года появление спутника состоялось в 11 часов 45 минут 55 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера, составляло: 4,310 А.е.

За прошедший период времени (169 часов 56 минут 05 секунд или 10196,083 минут) спутник совершил 4 обращения.

Истинный период одного обращения спутника относительно тени Юпитера (Т), в первом приближении, составил 2549,021 минуты (10196,083/4=2549,021)

$$T=2549,021 \text{ мин.}$$

Определим скорость света на участке удаления Земли от Юпитера с 7 Августа по 9 Ноября 1676 года.

7 Августа 1676 года появление спутника из тени Юпитера состоялось в 9 часов 49 минут 50 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера, составляло: 4,249 А.е.

9 Ноября 1676 года появление спутника Ио состоялось в 5 часов 45 минут 35 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера, составляло: 5,520 А.е.

За период времени с 7 Августа по 9 Ноября (2251 часа 55 минут 45 секунд или 135115,750 минут) спутник совершил 53 обращения (n=53)

Суммарное время 53 обращений, без учёта запаздывания света составило:

$$T \cdot n = 2549,021 \cdot 53 = 135098,113 \text{ минут}$$

Время запаздывания появления спутника из тени после 53 обращений составило: 135115,750 - 135098,113 = 17,637 минут.

С 7 Августа по 9 Ноября 1676 года Земля удалилась от Юпитера на 1,271 А.е. (5,520 - 4,249 = 1,271)

Скорость света в первом приближении определится из выражения:

$$c = \frac{1,271 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{17,637 \cdot 60} = 179681 \text{ км/с.}$$

Это не окончательный результат, поскольку при определении истинного периода обращения спутника не было учтено удаление Земли от Юпитера, см. таблицу 2.

7 Августа Земля находилась на расстоянии 4,249 А.е. от Юпитера, а 14 Августа расстояние Земли от Юпитера было 4,310 А.е. Удаление составило 0,061 А.е. Вследствие чего значение истинного периода обращения определено с ошибкой в большую сторону.

Расстояние 0,061 А.е. свет, распространяющийся со скоростью 179681 км/с, пройдет за время:

$$t = \frac{0,061 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{179681} = 50,79 \text{ сек.}$$

Это время запаздывания появления спутника из тени за 4 обращения.

Время запаздывания появления спутника из тени после одного обращения составит: 12,697 сек. ($50,79/4=12,697$) 12,697 сек = 0,212 мин.

Истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера во втором приближении, составит: $2549,021 - 0,212 = 2548,809$ мин.

$$T = 2548,809 \text{ мин.}$$

Суммарное время 53 обращений без учёта запаздывания света во втором приближении, составит: $2548,809 \cdot 53 = 135086,877$ мин.

Задержка появления спутника из тени после 53 обращений во втором приближении, составит: $135115,750 - 135086,877 = 28,873$ мин.

Скорость света во втором приближении, составит:

$$c = \frac{1,271 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{28,873 \cdot 60} = 109\,757 \text{ км/с}$$

Но и это не окончательный результат, поскольку истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера необходимо пересчитать для скорости света 109757 км/с

Расстояние 0,061 А.е. свет, распространяющийся со скоростью 109 757 км/с, пройдет за время:

$$t = \frac{0,061 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{109757} = 83,14 \text{ сек.}$$

Время запаздывания появления спутника из тени после одного обращения составит: 20,785 сек. ($83,14/4=20,785$) 20,785 сек. = 0,346 мин.

Истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера в третьем приближении, составит: $2549,021 - 0,346 = 2548,675$ мин.

$$T = 2548,675 \text{ мин.}$$

Суммарное время 53 обращений без учёта запаздывания света в третьем приближении, составит: $2548,675 \cdot 53 = 135079,775$ мин.

Задержка появления спутника из тени после 53 обращений в третьем приближении, составит: $135115,750 - 135079,775 = 35,975$ мин.

Скорость света в третьем приближении, составит:

$$c = \frac{1,271 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{35,975 \cdot 60} = 88\,090 \text{ км/с}$$

Проводя аналогичные расчёты, найдём скорость света в четвёртом приближении: 78 184 км/с

Скорость света в пятом приближении составит: 73 027 км/с

Скорость света в шестом приближении составит: 70 033 км/с

Скорость света в седьмом приближении составит: 68 274 км/с

Скорость света в восьмом приближении составит: 67 200 км/с

Скорость света в девятом приближении составит: 66 527 км/с

Скорость света в десятом приближении составит: 66 159 км/с

Истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера, в десятом приближении, равен: 2548,45 мин.

Как видно процесс сходится и за окончательное значение скорости света можно принять примерное значение: 66 000 км/с.

3.3 Определение скорости света по таблицам 1672, 1673, 1675, 1677г.

Для сравнения, определим скорости света, рассчитанные по таблицам 1672, 1673, 1675, 1677 годов, см. таблицы 3, 4, 5, 6. Эти таблицы представляют собой извлечения из таблицы 1, с добавлением величин расстояний от Земли до Юпитера, определённых по программе Stellarium 0.13.3.

3.3.1. Определение скорости света на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1672 года

Для определения скорости света при приближении Земли к точке противостояния в 1672 году, воспользуемся таблицей 3 и расчётной схемой, изображённой на рисунке 3.

1672 год

Погружение дата, часы, минуты, секунды, расстояние	Появление дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 2 Марта 1672 года	
3 Января 12.42.36; 4,929 А.е.	7 Марта 7.58.25; 4,434 А.е.
10 Января 14.32.14.	14 Марта 9.52.30; 4,451 А.е.
12 Января 8.59.22.	23 Марта 6.18.14.
11 Февраля 10.57.6; 4,500 А.е.	28 Марта 13.45.30.
20 Февраля 7.20.26; 4,455 А.е.	30 Марта 8.14.46
	6 Апреля 10.11.22.
	13 Апреля 12.8.8.
	22 Апреля 8.34.28.
	29 Апреля 10.30.6; 4,877 А.е.
28 Ноября 5.37.5; 5,962 А.е.	

Таблица 3

Расчётная схема



Рис. 3

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

F_1, F_2, F_3 - точки наблюдения на земной орбите за погружением в тень Юпитера спутника Ио;

C_1, C_2, C_3 - точки, обозначающие спутник Ио, погружающийся в тень Юпитера;

F_1C_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_1 , при погружении спутника 3 Января 1672 года, или расстояние от Земли до спутника 3 Января 1672 года;

F_2C_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_2 , 11 Февраля 1672 года, или расстояние от Земли до спутника 11 Февраля 1672 года;

F_3C_3 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_3 , 20 Февраля 1672 года, или расстояние от Земли до спутника 20 Февраля 1672 года;

F_2G_2 - приближение Земли к спутнику (приближение Земли к Юпитеру) за период с 11 по 20 Февраля (за пять обращений спутника);

$$F_2G_2 = F_2C_2 - F_3C_3$$

F_1G_1 - приближение Земли к спутнику (приближение Земли к Юпитеру) за период с 3 Января по 20 Февраля 1672 года (за 27 обращений спутника). Это измерительный участок, на котором определяется скорость света.

$$F_1G_1 = F_1C_1 - F_3C_3$$

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени Юпитера воспользуемся наблюдениями за погружением спутника от 11 и 20 Февраля 1672 года, см. таблицу 3.

11 Февраля 1672 года погружение спутника произошло в 10 часов 57 минут 06 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,500 А.е.

20 Февраля 1672 года погружение спутника произошло в 7 часов 20 минут 26 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,455 А.е.

Приближение Земли к Юпитеру составило 0,045 А.е

За прошедший период времени (212 часов 23 минуты 20 секунд или 12743,333 минуты) спутник совершил 5 обращений

Истинный период одного обращения спутника относительно тени Юпитера (Т), в первом приближении, составил 2548,666 минуты ($12743,333/5=2548,666$)

Определим скорость света на участке приближения Земли к точке противостояния от 3 Января до 20 Февраля 1672 года.

3 Января 1672 года погружение спутника произошло в 12 часов 42 минуты 36 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,929 А.е.

20 Февраля 1672 года погружение спутника произошло в 7 часов 20 минут 26 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,455 А.е.

Земля приблизилась к Юпитеру на 0,474 А.е. ($4,929 - 4,455 = 0,474$)

За период с 3 Января по 20 Февраля 1672 года (68797,833 минуты) спутник совершил 27 обращений.

Время, затраченное на 27 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта опережения светового сигнала, составит:

$$2548,666 \cdot 27 = 68813,982 \text{ мин.}$$

Время опережения светового сигнала составит:

$$68813,982 - 68797,833 = 16,149 \text{ мин.}$$

Скорость света в первом приближении определится из выражения:

$$c = \frac{0,474 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{16,149 \cdot 60} = 73\,183 \text{ км/с}$$

Это не окончательная скорость, так как при определении истинного периода обращения спутника не учтено приближение Земли к Юпитеру (0,045 А.е.)

Расстояние 0,045 А.е. свет, распространяющийся со скоростью 73183 км/с, пройдёт за следующее время:

$$t = \frac{0,045 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{73183} = 91,99 \text{ сек.}$$

Время опережения погружения спутника после одного обращения, составит 18,40 секунд, или 0,307 мин. ($91,99/5 = 18,40$)

Истинный период обращения спутника во втором приближении, составит:

$$T = 2548,666 + 0,307 = 2548,973 \text{ мин.}$$

$$T = 2548,973 \text{ мин.}$$

Время, затраченное на 27 обращений спутника без учёта опережения светового сигнала, составит:

$$2548,973 \cdot 27 = 68822,271 \text{ мин.}$$

Время опережения светового сигнала после 27 обращений спутника, составит: $68822,271 - 68797,833 = 24,438$ мин.

Скорость света во втором приближении определится из выражения:

$$c = \frac{0,434 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{24,438 \cdot 60} = 44\,280 \text{ км/с.}$$

Скорость света в третьем приближении, составит: 36 327 км/с.

Скорость света в четвёртом приближении, составит: 33 006 км/с.

Скорость света в пятом приближении, составит: 31 403 км/с.

Скорость света в шестом приближении, составит: 30 564 км/с.

Скорость света в седьмом приближении, составит: 30 086 км/с.

Окончательное значение скорости света примерно равно 30 000 км/с.

$$T = 2549,40 \text{ мин.}$$

Для определения скорости света в 1672 году, при удалении Земли от точки противостояния, воспользуемся наблюдениями за появлениями спутника (таблица 3) и расчётной схемой, изображённой на рис.4

1672 год

Погружение дата, часы, минуты, секунды, расстояние	Появление дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 2 Марта 1672 года	
3 Января 12.42.36; 4,929 А.е.	7 Марта 7.58.25; 4,434 А.е.
10 Января 14.32.14.	14 Марта 9.52.30; 4,451 А.е.
12 Января 8.59.22.	23 Марта 6.18.14.
11 Февраля 10.57.6; 4,500 А.е.	28 Марта 13.45.30.
20 Февраля 7.20.26; 4,455 А.е.	30 Марта 8.14.46
	6 Апреля 10.11.22.
	13 Апреля 12.8.8.
	22 Апреля 8.34.28.
	29 Апреля 10.30.6; 4,877 А.е.
28 Ноября 5.37.5; 5,962 А.е.	

Таблица 3



Рис. 4

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

K_1, K_2, K_3 - точки наблюдения на земной орбите за появлением из тени Юпитера спутника Ио;

D_1, D_2, D_3 - точки, обозначающие спутник Ио, появляющийся из тени Юпитера;

K_3D_3 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_3 , после заключительного появления спутника 29 Апреля 1672 года, или расстояние от Земли до спутника 29 Апреля 1672 года;

K_1D_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_1 , 7 Марта 1672 года, или расстояние от Земли до спутника 7 Марта 1672 года;

K_2D_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_2 , 14 Марта 1672 года, или расстояние от Земли до спутника 14 Марта 1672 года;

K_2L_2 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 7 по 14 Марта (за четыре обращения спутника);

$$K_2L_2 = K_2D_2 - K_1D_1$$

K_3L_3 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 7 Марта по 29 Апреля 1672 года (за 30 обращений спутника). Это измерительный участок, на котором определяется скорость света.

$$K_3L_3 = K_3D_3 - K_1D_1$$

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени Юпитера воспользуемся наблюдениями за появлением спутника от 7 и 14 марта 1672 года, см. таблицу 3.

7 Марта 1672 года появление спутника произошло в 7 часов 58 минут 25 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,434 А.е.

14 Марта 1672 года появление спутника произошло в 9 часов 52 минуты 30 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,451 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера увеличилось на 0,017 А.е.

За прошедший период времени (169 часов 54 минуты 5 секунд или 10194,083 минуты) спутник совершил 4 обращения

Истинный период одного обращения спутника относительно тени Юпитера (Т), в первом приближении, составил 2548,521 минуты ($10194,083/4=2548,521$)

Определим скорость света на участке удаления Земли от точки противостояния с 7 Марта по 29 Апреля 1672 года.

7 Марта 1672 года появление спутника произошло в 7 часов 58 минут 25 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,434 А.е.

29 Апреля 1672 года появление спутника произошло в 10 часов 30 минут 6 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составило 4,877 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера увеличилось на 0,443 А.е.

За период с 7 Марта по 29 Апреля 1672 года (1274 часа 31 минута 41 сек, или 76471,683 мин.) спутник совершил 30 обращений.

Время, затраченное на 30 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта запаздывания светового сигнала, составит:

$$2548,521 \cdot 30 = 76455,63 \text{ мин.}$$

Время запаздывания светового сигнала составит:

$$76471,683 - 76455,63 = 16,053 \text{ мин.}$$

Скорость света в первом приближении составит:

$$c = \frac{0,443 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{16,053 \cdot 60} = 68\,806 \text{ км/с.}$$

$T=2548,521$ мин. Это завышенное значение, поскольку с 7 по 14 Марта, при определении истинного периода обращения спутника, расстояние от Земли до Юпитера увеличилось на 0,017 А.е.

Время, за которое свет, распространяющийся со скоростью 68806 км/с, преодолевает расстояние 0,017 А.е., найдётся из выражения:

$$t = \frac{0,017 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{68806} = 36,96 \text{ сек.}$$

Следовательно, истинное время одного обращения спутника необходимо уменьшить на 9,24 секунды ($36,96/4=9,24$) 9,24 сек.=0,154 мин

И истинный период обращения спутника во втором приближении, составит: $T= 2548,521 - 0,124=2548,367$ мин.

$$T=2548,367 \text{ мин.}$$

Время, затраченное на 30 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта запаздывания светового сигнала, составит:

$$2548,367 \cdot 30 = 76451,01 \text{ мин.}$$

Время запаздывания светового сигнала составит:

$$76471,683 - 76451,01 = 20,673 \text{ мин.}$$

Увеличение расстояния от Земли до Юпитера, составило:

$$4,877 - 4,434 = 0,443 \text{ А.е.}$$

Скорость света во втором приближении определится из выражения:

$$c = \frac{0,443 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{20,673 \cdot 60} = 53\,429 \text{ км/с}$$

$$c = 53\,429 \text{ км/с}$$

Это не окончательное значение скорости света. Вычислим скорость света в третьем приближении.

Время, за которое свет, распространяющийся со скоростью 53429 км/с, пройдет расстояние 0,017 А.е., найдётся из выражения:

$$t = \frac{0,017 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{53429} = 47,6 \text{ сек.}$$

Следовательно, истинное время одного обращения спутника необходимо уменьшить на 11,9 секунды ($47,6/4 = 11,9$) 11,9 сек. = 0,198 мин

И истинный период обращения спутника в третьем приближении, составит: $T = 2548,521 - 0,198 = 2548,323$ мин.

$$T = 2548,323 \text{ мин.}$$

Время, затраченное на 30 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта запаздывания светового сигнала, составит:

$$2548,323 \cdot 30 = 76449,69 \text{ мин.}$$

Время запаздывания светового сигнала составит:

$$76471,683 - 76449,69 = 21,993 \text{ мин.}$$

Скорость света в третьем приближении определится из выражения:

$$c = \frac{0,443 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{21,993 \cdot 60} = 50\,223 \text{ км/с}$$

$$c = 50\,223 \text{ км/с}$$

Скорость света в четвёртом приближении, составит: 49 348 км/с

Скорость света в пятом приближении, составит: 49 084 км/с

Скорость света в шестом приближении, составит: 49 019 км/с

За окончательное значение скорости света примем 49 000 км/с

$$c = 49\,000 \text{ км/с}$$

$$T = 2548,305 \text{ мин.}$$

3.3.2. Определение скорости света на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1673 года

Для определения скорости света в 1673 году, при приближении Земли к точке противостояния, воспользуемся таблицей 4 и расчётной схемой изображённой на рис. 5

1673 год

Погружение дата, часы, минуты, секунды, расстояние	Появление дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 2 Апреля 1673 года	
4 Февраля 17.31.10; 4,913 А.е.	18 Апреля 9.22.0; 4,481 А.е.
6 Февраля 12.0.0.	25 Апреля 11.18.5; 4,520 А.е.
13 Февраля 13.53.20.	2 Мая 13.12.40.
27 Февраля 17.40.10.	11 Мая 9.17.39.
1 Марта 12.9.1.	18 Мая 11.32.44.
15 Марта 16.0.48	4 Августа 8.30.41; 5,860 А.е.
17 Марта 10.28.16; 4,494 А.е.	
24 Марта 12.24.30; 4,464 А.е.	

Таблица 4

Расчётная схема

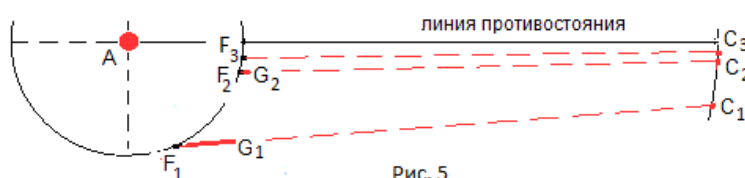


Рис. 5

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

F_1, F_2, F_3 - точки наблюдения на земной орбите за погружением в тень Юпитера спутника

Ио;

C_1, C_2, C_3 - точки, обозначающие спутник Ио, погружающийся в тень Юпитера;

F_1C_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_1 , при погружении спутника 4 Февраля 1673 года, или расстояние от Земли до спутника 4 Февраля 1673 года;

F_2C_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_2 , 17 Марта 1673 года, или расстояние от Земли до спутника 17 Марта 1673 года;

F_3C_3 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_3 , 24 Марта 1673 года, или расстояние от Земли до спутника 24 Марта 1673 года;

F_2G_2 - приближение Земли к спутнику (приближение Земли к Юпитеру) за период с 17 по 24 Марта (за четыре обращения спутника);

$$F_2G_2 = F_2C_2 - F_3C_3$$

F_1G_1 - приближение Земли к спутнику (приближение Земли к Юпитеру) за период с 4 Февраля по 24 Марта 1673 года (за 27 обращений спутника). Это измерительный участок, на котором определяется скорость света.

$$F_1G_1 = F_1C_1 - F_3C_3$$

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени Юпитера воспользуемся наблюдениями за погружением спутника от 17 и 24 марта 1673 года, см таблицу 4.

17 Марта 1673 года погружение спутника произошло в 10 часов 28 минут 16 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,494 А.е.

24 Марта 1673 года погружение спутника произошло в 10 часов 24 минуты 30 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,464 А.е. Расстояние от Земли до Юпитера уменьшилось на 0,030 А.е.

За прошедший период времени (169 часов 56 минут 14 секунд или 10196,233 минут) спутник совершил 4 обращения

Истинный период обращения спутника, в первом приближении, составит: $T=2549,058$ мин. ($10196,233/4=2549,058$)

Определим скорость света на участке приближения Земли к точке противостояния с 4 Февраля по 24 Марта 1673 года.

4 Февраля 1673 года погружение спутника произошло в 17 часов 31 минуту 10 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,913 А.е.

24 Марта 1673 года погружение спутника произошло в 12 часов 24 минуты 30 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составило 4,464 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера уменьшилось на 0,449 А.е.

За период с 4 Февраля по 24 Марта 1673 года (1146 часов 53 минуты 20 сек, или 68813,333 мин.) спутник совершил 27 обращений.

Время, затраченное на 27 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта опережения светового сигнала, составит:

$$T \cdot n = 2549,058 \cdot 27 = 68824,566 \text{ мин.}$$

Время опережения светового сигнала, составит:

$$68824,566 - 68813,333 = 11,233 \text{ мин.}$$

Скорость света в первом приближении составит:

$$c = \frac{0,449 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{11,233 \cdot 60} = 99\,662 \text{ км/с.}$$

Это завышенное значение скорости света, так как значение истинного периода обращения (2549,058 мин.) необходимо уточнить, поскольку период обращения спутника определён без учёта уменьшения расстояния от Земли до Юпитера на 0,030 А.е.

Время, за которое свет, распространяющийся со скоростью 99662 км/с, преодолевает расстояние 0,030 А.е., найдётся из выражения:

$$t = \frac{0,030 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{99662} = 45,03 \text{ сек.}$$

Следовательно, истинное время одного обращения спутника необходимо увеличить на 11,26 секунды ($45,03/4=11,26$) 11,26 сек.=0,188 мин. И истинный период обращения спутника во втором приближении, составит: $2549,058+0,188=2549,246$ мин.

$$T=2549,246 \text{ мин.}$$

Время, затраченное на 27 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта опережения светового сигнала, во втором приближении, составит:

$$T \cdot n = 2549,246 \cdot 27 = 68829,642 \text{ мин.}$$

Время опережения светового сигнала во втором приближении, составит:
 $68829,642 - 68813,333 = 16,309$ мин.

Скорость света во втором приближении составит:

$$c = \frac{0,449 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{16,309 \cdot 60} = 68\,643 \text{ км/с}$$

Скорость света в третьем приближении, составит: 60 263 км/с.

Скорость света в четвертом приближении, составит: 57 109 км/с.

Скорость света в пятом приближении, составит: 55 802 км/с.

Скорость света в шестом приближении, составит: 55 208 км/с.

Скорость света в окончательном приближении примерно составляет: 55 000 км/с.

Истинный период обращения равен: 2549,393 мин.

Для определения скорости света в 1673 году, при удалении Земли от точки противостояния, воспользуемся таблицей 4 и расчётной схемой, изображённой на рисунке 6.

1673 год

Погружение дата, часы, минуты, секунды, расстояние	Появление дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 2 Апреля 1673 года	
4 Февраля 17.31.10; 4,913 А.е.	18 Апреля 9.22.0; 4,481 А.е.
6 Февраля 12.0.0.	25 Апреля 11.18.5; 4,520 А.е.
13 Февраля 13.53.20.	2 Мая 13.12.40.
27 Февраля 17.40.10.	11 Мая 9.17.39.
1 Марта 12.9.1.	18 Мая 11.32.44.
15 Марта 16.0.48	4 Августа 8.30.41; 5,860 А.е.
17 Марта 10.28.16; 4,494 А.е.	
24 Марта 12.24.30; 4,464 А.е.	

Таблица 4

Расчётная схема



Рис. 6

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

K_1, K_2, K_3 - точки наблюдения на земной орбите за появлением из тени Юпитера спутника Ио;

D_1, D_2, D_3 - точки, обозначающие спутник Ио, появляющийся из тени Юпитера;

$K_3 D_3$ - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_3 , после заключительного появления спутника на измерительном участке 18 Мая 1673 года, или расстояние от Земли до спутника 18 Мая 1673 года;

K_1D_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_1 , 18
Апреля 1673 года, или расстояние от Земли до спутника 18 Апреля 1673 года;

K_2D_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_2 ,
25 Апреля 1673 года, или расстояние от Земли до спутника 25 Апреля 1673 года;

K_2L_2 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 18 по 25
Апреля 1673 года (за четыре обращения спутника);

$$K_2L_2 = K_2D_2 - K_1D_1$$

K_3L_3 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 18 Апреля по
18 Мая 1673 года (за 17 обращений спутника). Это измерительный участок, на котором
определяется скорость света.

$$K_3L_3 = K_3D_3 - K_1D_1$$

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени
Юпитера воспользуемся наблюдениями за появлением спутника от 18 и 25 Апреля 1673 года.

18 Апреля 1673 года появление спутника произошло в 9 часов 22 минуты 0 секунд.
Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,481 А.е.

25 Апреля 1673 года появление спутника произошло в 11 часов 18 минуты 5 секунд.
Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,520 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера увеличилось на 0,039 А.е.

За прошедший период времени (169 часов 56 минут 5 секунд, или 10196,083 минуты)
спутник совершил 4 обращения

Истинный период одного обращения спутника относительно тени Юпитера (Т), в первом
приближении, составил 2549,021 минуты (10196,083/4=2549,021)

Определим скорость света на участке удаления Земли от точки противостояния с 18 Апреля по 18
Мая 1673 года.

18 Апреля 1673 года появление спутника произошло в 9 часов 22 минуты 0 секунд.

18 Мая 1673 года появление спутника произошло в 11 часов 32 минуты 44 секунды.

За период с 18 Апреля по 18 Мая 1673 года (722 час. 10 мин. 44 сек., или 43320,733 мин.)
спутник совершил 17 обращений.

Время, затраченное на 17 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта
запаздывания светового сигнала, составит:

$$2549,021 * 17 = 43333,357 \text{ мин.}$$

Время запаздывания светового сигнала составит:

$$43320,733 - 43333,357 = - 12,624 \text{ мин.}$$

То есть, запаздывания сигнала нет. Следовательно, на данном измерительном участке
измерить скорость света методом Рёмера невозможно. Причина заключается в том, что на данном
участке уменьшается сидерический период обращения спутника, соответственно уменьшается и
истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера. Причём величина
уменьшения истинного периода обращения превосходит увеличение периода обращения
вследствие запаздывания светового сигнала. Причина неравномерного обращения спутника Ио,
по-видимому, обусловлена влиянием ближайших спутников Юпитера, с которыми

синхронизирован период обращения спутника Ио. Синхронизация периодов обращения спутников имеет, по-видимому, динамический характер. Спутник Ио то уходит вперёд от точки синхронизации, то отстаёт. Вследствие чего период обращения спутника Ио представляет собой сложную периодическую функцию.

3.3.3. Определение скорости света на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1675 года

Для определения скорости света в 1675 году, при удалении Земли от точки противостояния, воспользуемся таблицей 5 и расчётной схемой, изображённой на рисунке 7

1675 год

Погружение дата, часы, минуты, секунды, расстояние	Появление дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 3 Июня 1675 года	
	20 Июля 8.22.42; 4,536 А.е.
	27 Июля 10.17.31; 4,619 А.е.
	29 Октября 6.7.22; 5,922 А.е.

Таблица 5

Расчётная схема



Рис. 7

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

K_1, K_2, K_3 - точки наблюдения на земной орбите за появлением из тени Юпитера спутника Ио;

D_1, D_2, D_3 - точки, обозначающие спутник Ио, появляющийся из тени Юпитера;

K_3D_3 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_3 , после заключительного появления спутника на измерительном участке 29 Октября 1675 года, или расстояние от Земли до спутника 29 Октября 1675 года;

K_1D_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_1 , 20 Июля 1675 года, или расстояние от Земли до спутника 20 Июля 1675 года;

K_2D_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_2 , 27 Июля 1675 года, или расстояние от Земли до спутника 27 Июля 1675 года;

K_2L_2 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 20 по 27 Июля 1675 года (за четыре обращения спутника);

$$K_2L_2 = K_2D_2 - K_1D_1$$

K_3L_3 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 20 Июля по 29 Октября 1675 года (за 57 обращений спутника). Это измерительный участок, на котором определяется скорость света.

$$K_3L_3 = K_3D_3 - K_1D_1$$

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени Юпитера воспользуемся наблюдениями за появлением спутника от 20 и 27 Июля 1675 года.

20 Июля 1675 года появление спутника произошло в 8 часов 22 минуты 42 секунды. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,536 А.е.

27 Июля 1675 года появление спутника произошло в 10 часов 17 минут 31 секунду. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,619 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера увеличилось на 0,083 А.е.

За прошедший период времени (169 часов 54 минуты 49 секунд или 10194,817 минут) спутник совершил 4 обращения

Истинный период одного обращения спутника относительно тени Юпитера (Т), в первом приближении, составил 2548,704 минуты ($10194,817/4=2548,704$)

Определим скорость света на участке удаления Земли от точки противостояния с 20 Июля по 29 Октября 1675 года.

20 Июля 1675 года появление спутника произошло в 8 часов 22 минуты 42 секунды. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,536 А.е.

29 Октября 1675 года появление спутника произошло в 6 часов 7 минут 22 секунды. Расстояние от Земли до Юпитера составило 5,922 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера увеличилось на 1,386 А.е.

За период с 20 Июля по 29 Октября 1675 года (2421 часа 44 минуты 40 секунд, или 145304,667 мин.) спутник совершил 57 обращений.

Время, затраченное на 57 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта запаздывания светового сигнала, составит:

$$2548,704 \cdot 57 = 145276,128 \text{ мин.}$$

Время запаздывания светового сигнала составит:

$$145304,667 - 145276,128 = 28,539 \text{ мин.}$$

Скорость света в первом приближении составит:

$$c = \frac{1,386 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{28,539 \cdot 60} = 121\,089 \text{ км/с.}$$

$T=2548,704$ мин. Это завышенное значение, поскольку расстояние от Земли до Юпитера за период с 20 по 27 Июля увеличилось на 0,083 А.е.

Второе приближение.

Время, за которое свет, распространяющийся со скоростью 121089 км/с, преодолевает расстояние 0,083 А.е., найдётся из выражения:

$$t = \frac{0,083 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{121089} = 102,54 \text{ сек.}$$

Следовательно, истинное время одного обращения спутника необходимо уменьшить на 25,64 секунды ($102,54/4=25,64$) $25,64 \text{ сек.} = 0,427 \text{ мин}$

И истинный период обращения спутника во втором приближении, составит: $T = 2548,704 - 0,427 = 2548,277$ мин.

$T = 2548,277$ мин.

Время, затраченное на 57 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта запаздывания светового сигнала, составит:

$2548,277 \cdot 57 = 145251,789$ мин.

Время запаздывания светового сигнала составит:

$145304,667 - 145251,789 = 52,878$ мин. Увеличение расстояния от Земли до Юпитера за 57 обращений, составило: 1,386 А.е.

Скорость света во втором приближении определится из выражения:

$$c = \frac{1,386 \cdot 149,6 \cdot 10^6}{52,878 \cdot 60} = 65\,353 \text{ км/с}$$

Это также не окончательное значение скорости света.

В третьем приближении скорость света составит 47 065 км/с

В десятом, окончательном, приближении скорость света составит 22350 км/с., а истинный период обращения составит 2546,492 минуты

3.3.4. Определение скорости света на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1677 года

Для определения скорости света в 1677 году, при приближении Земли к точке противостояния, воспользуемся таблицей 6 и расчётной схемой, изображённой на рисунке 8

1677 год

Погружение дата, часы, минуты, секунды, расстояние	Появление дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 4 Августа 1677 года	
9 Июня 12.23.24; 4,581 А.е.	26 Августа 11.31.50; 4,032 А.е.
16 Июня 14.16.14.	11 Сентября 9.54.30; 4,121 А.е.
9 Июля 14.21.54.	5 Ноября 6.59.0; 4,819 А.е.
18 Июля 10.47.0; 4,125 А.е.	
25 Июля 12.37.10; 4,076 А.е.	

Таблица 6
Расчётная схема

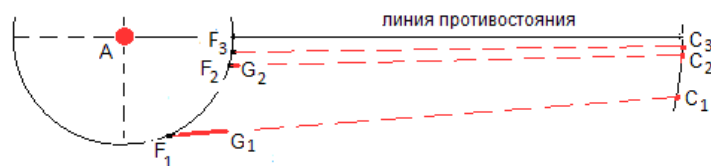


Рис. 8

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

F_1, F_2, F_3 - точки наблюдения на земной орбите за погружением в тень Юпитера спутника

Ио;

C_1, C_2, C_3 - точки, обозначающие спутник Ио, погружающийся в тень Юпитера;

F_1C_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_1 , при погружении спутника 9 Июня 1677 года, или расстояние от Земли до спутника 9 Июня 1677 года;

F_2C_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_2 , 18 Июля 1677 года, или расстояние от Земли до спутника 18 Июля 1677 года;

F_3C_3 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке C_3 , 25 Июля 1677 года, или расстояние от Земли до спутника 25 Июля 1677 года;

F_2G_2 - приближение Земли к спутнику (приближение Земли к Юпитеру) за период с 18 по 25 Июля (за четыре обращения спутника);

$$F_2G_2 = F_2C_2 - F_3C_3$$

F_1G_1 - приближение Земли к спутнику (приближение Земли к Юпитеру) за период с 9 Июня по 25 Июля 1677 года (за 26 обращений спутника). Это измерительный участок, на котором определяется скорость света.

$$F_1G_1 = F_1C_1 - F_3C_3$$

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени Юпитера воспользуемся наблюдениями за погружением спутника от 18 и 25 Июля 1677 года, см. таблицу 6.

18 Июля 1677 года погружение спутника произошло в 10 часов 47 минут 0 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,125 А.е.

25 Июля 1677 года погружение спутника произошло в 12 часов 37 минут 10 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,076 А.е. Расстояние от Земли до Юпитера уменьшилось на 0,049 А.е.

За прошедший период времени (169 часов 50 минут 10 секунд или 10190,17 минут) спутник совершил 4 обращения

Истинный период обращения спутника, в первом приближении, составит: $T=2547,542$ мин. ($10190,17/4=2547,542$)

Определим скорость света на участке приближения Земли к точке противостояния с 9 Июня по 25 Июля 1677 года.

9 Июня 1677 года погружение спутника произошло в 12 часов 23 минуты 24 секунды. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,581 А.е.

25 Июля 1677 года погружение спутника произошло в 12 часов 37 минут 10 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составило 4,076 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера уменьшилось на 0,505 А.е.

За период с 9 Июня по 25 Июля 1677 года (1104 часа 13 минут 46 секунд, или 66240,767 мин.) спутник совершил 26 обращений.

Время, затраченное на 26 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта опережения светового сигнала, составит:

$$T*n=2547,542*26=66236,092 \text{ мин.}$$

Время опережения светового сигнала, составит:

$$66236,092-66240,767=-4,675 \text{ мин.}$$

Следовательно, в данном случае, определить скорость света методом Рёмера не представляется возможным.

Для определения скорости света в 1677 году, при удалении Земли от точки противостояния, воспользуемся таблицей 6 и расчётной схемой, изображённой на рисунке 9

1677 год

Погружение дата, часы, минуты, секунды, расстояние	Появление дата, часы, минуты, секунды, расстояние
Противостояние Земли и Юпитера 4 Августа 1677 года	
9 Июня 12.23.24; 4,581 А.е.	26 Августа 11.31.50; 4,032 А.е.
16 Июня 14.16.14.	11 Сентября 9.54.30; 4,121 А.е.
9 Июля 14.21.54.	5 Ноября 6.59.0; 4,819 А.е.
18 Июля 10.47.0; 4,125 А.е.	
25 Июля 12.37.10; 4,076 А.е.	

Таблица 6

Расчётная схема

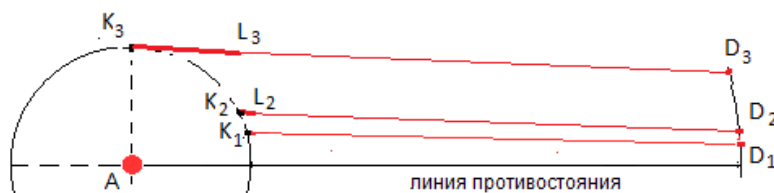


Рис. 9

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – Солнце;

K_1, K_2, K_3 - точки наблюдения на земной орбите за появлением из тени Юпитера спутника Ио;

D_1, D_2, D_3 - точки, обозначающие спутник Ио, появляющийся из тени Юпитера;

K_3D_3 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_3 , после заключительного появления спутника на измерительном участке 5 Ноября 1677 года, или расстояние от Земли до спутника 5 Ноября 1677 года;

K_1D_1 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_1 , 26 Августа 1677 года, или расстояние от Земли до спутника 26 Августа 1677 года;

K_2D_2 - расстояние, пройденное светом, отражённым от поверхности спутника в точке D_2 , 11 Сентября 1677 года, или расстояние от Земли до спутника 11 Сентября 1677 года;

K_2L_2 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 26 Августа по 11 Сентября 1677 года (за девять обращений спутника);

$$K_2L_2 = K_2D_2 - K_1D_1$$

K_3L_3 - удаление Земли от спутника (удаление Земли от Юпитера) за период с 26 Августа по 5 Ноября 1677 года (за 40 обращений спутника). Это измерительный участок, на котором определяется скорость света.

$$K_3L_3 = K_3D_3 - K_1D_1$$

Для определения истинного периода обращения спутника Юпитера Ио относительно тени Юпитера воспользуемся наблюдениями за появлением спутника от 26 Августа и 11 Сентября 1677 года.

26 Августа 1677 года появление спутника произошло в 11 часов 31 минуту 50 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,032 А.е.

11 Сентября 1677 года появление спутника произошло в 9 часов 54 минуты 30 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,121 А.е.

Расстояние от Земли до Юпитера увеличилось на 0,089 А.е.

За прошедший период времени (382 часа 22 минуты 40 секунд или 22942,667 минут) спутник совершил 9 обращений.

Истинный период одного обращения спутника относительно тени Юпитера (Т), в первом приближении, составил 2549,185 минут ($22942,667/9=2549,185$)

Определим скорость света на участке удаления Земли от точки противостояния с 26 Августа по 5 Ноября 1677 года.

26 Августа 1677 года появление спутника произошло в 11 часов 31 минуту 50 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составляло 4,032 А.е.

5 Ноября 1677 года появление спутника произошло в 6 часов 59 минут 0 секунд. Расстояние от Земли до Юпитера составило 4,819 А.е.

За период с 26 Августа по 5 Ноября 1677 года (1699 часов 27 минут 10 секунд, или 101967,167 мин.) спутник совершил 40 обращений.

Время, затраченное на 40 обращений спутника относительно тени Юпитера, без учёта запаздывания светового сигнала, составит:

$$2549,185 \cdot 40 = 101967,4 \text{ мин.}$$

Время запаздывания светового сигнала составит:

$$101967,167 - 101967,4 = -0,233 \text{ мин.}$$

Следовательно, и в данном случае, определить скорость света методом Рёмера не представляется возможным.

3.4. Результаты измерений скорости света методом Рёмера по таблицам затмений спутника Юпитера Ио 1672, 1673, 1675, 1676, 1677 годов.

Сравним полученные значения скорости света:

По таблице 1676 года, при удалении Земли от Юпитера, расчетная скорость света примерно составила 66 000 км/с. Истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера составил 2548,45 мин.

По таблице 1672 года, при приближении Земли к Юпитеру, расчётная скорость света примерно составила 30 000 км/с. Истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера составил 2549,40 мин.

По таблице 1672 года, при удалении Земли от Юпитера, расчётная скорость света примерно составила 49 000 км/с. Истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера составил 2548,305 мин.

По таблице 1673 года, при приближении Земли к Юпитеру, расчётная скорость света примерно составила 55 000 км/с. Истинный период обращения спутника относительно тени Юпитера составил 2549,393 мин.

По таблице 1673 года, при удалении Земли от Юпитера, определить скорость света методом Рёмера не представляется возможным, из-за сильного возмущения орбиты спутника и, как следствие, из-за изменения истинного периода обращения спутника, превышающего эффект изменения наблюдаемого периода обращения вследствие конечной скорости света.

По таблице 1675 года, при удалении Земли от Юпитера, расчётная скорость света примерно составила 22 300 км/с. Истинный период обращения спутника составил 2546,492 мин.

По таблице 1677 года, при приближении Земли к Юпитеру, определить скорость света методом Рёмера не представляется возможным, из-за сильного возмущения орбиты спутника и изменения истинного периода обращения спутника, превышающего эффект изменения наблюдаемого периода обращения вследствие конечной скорости света.

По таблице 1677 года, при удалении Земли от Юпитера, определить скорость света методом Рёмера не представляется возможным, из-за сильного возмущения орбиты спутника и изменения истинного периода обращения спутника, превышающего эффект изменения наблюдаемого периода обращения вследствие конечной скорости света.

Метод Рёмера предполагает постоянство истинного периода обращения спутника, по крайней мере, на измерительном участке, который соответствует временному интервалу в несколько месяцев.

На трёх измерительных участках в периоды времени сильных возмущений орбиты спутника (1673 года, при удалении Земли от Юпитера; 1677 года, при приближении и удалении Земли от Юпитера) изменение истинного периода обращения спутника превышало наблюдаемое изменение периода обращения спутника, связанное с конечной скоростью света. Что не позволило на этих измерительных участках определить скорость света. Формально можно считать, что на этих участках получена бесконечная скорость света.

Но и там, где удалось определить конечную скорость света, нет никакой уверенности в том, что истинный период обращения спутника на этих измерительных участках оставался постоянным. Единственно, что можно утверждать, так это то, что изменение истинного периода обращения спутника на этих участках меньше изменения наблюдаемого периода обращения спутника, связанного с конечной скоростью света. Эти периоды времени можно назвать относительно спокойными. Изменение истинного периода обращения спутника может, как уменьшать, так и увеличивать измеряемую скорость света. Невозможно сказать в какой год, на каком измерительном участке, вычислена более правильная скорость света. Поэтому найдём среднее значение скорости света для пяти измерительных участков, где получены конечные скорости света.

$$c = \frac{66000 + 30000 + 49000 + 55000 + 22300}{5} = 44\,460 \approx 44\,500 \text{ км/с}$$

Разброс результатов отдельных измерений скорости света от среднего значения довольно большой, следовательно, точность измерения скорости света методом Рёмера невелика, но порядок величины скорости света определяется достаточно надёжно. И ни о каком примерном равенстве со скоростью света 300 000 км/с., здесь не может быть и речи.

Это расхождение в величинах скоростей света можно объяснить различными параметрами среды, в которой распространяется свет вблизи поверхности Земли, где ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$, и вдали от Солнца и от земной поверхности.

Дополнительный участок пути, который проходит свет, вследствие удаления Земли от Юпитера является измерительным участком, на котором определяется скорость света, он расположен вблизи орбиты Земли. Напряжённость гравитационного поля в этой области космического пространства в основном определяется Солнцем, влиянием гравитационных полей Земли, других планет и звёзд здесь можно пренебречь. Ускорение свободного падения в этой области примерно равно $0,06 \text{ м/с}^2$, что на два порядка меньше ускорения свободного падения у поверхности Земли. Отсюда и столь существенное различие в скоростях света.

4. Выводы

1. В данной статье выполнены расчёты скорости света методом Рёмера на основе таблиц затмений спутника Юпитера Ио 1672, 1673, 1675, 1676, 1677 годов, которыми пользовался Рёмер.

2. Метод Рёмера заключается в следующем:

- определение истинного периода обращения спутника Ио относительно тени Юпитера в то время когда Земля движется практически параллельно Юпитеру, приближаясь к линии противостояния или удаляясь от нее;

- определение дополнительного пути, который проходит отражённый солнечный свет после нескольких десятков обращений спутника. То есть определение длины измерительного участка, соответствующего заданному количеству обращений спутника;

- определение расчётного времени заданного количества обращений спутника, равного произведению количества обращений на величину истинного периода обращения спутника;

- определение фактического времени заданного количества обращений спутника, по результатам наблюдений;

- определение разности между фактическим и расчётным временем заданного количества обращений спутника, то есть определение времени запаздывания или опережения светового сигнала;

- определение скорости света делением длины измерительного участка на время запаздывания, или опережения светового сигнала.

3. При расчёте скорости света методом Рёмера получены следующие результаты:

- скорость света, рассчитанная по таблицам 1676 года, при удалении Земли от Юпитера, составила: 66 000 км/с;

- скорость света, рассчитанная по таблицам 1672 года, при приближении Земли к Юпитеру, составила: 30 000 км/с;

- скорость света, рассчитанная по таблицам 1672 года, при удалении Земли от Юпитера, составила: 49 000 км/с;

- скорость света, рассчитанная по таблицам 1673 года, при приближении Земли к Юпитеру, составила: 55 000 км/с;

- скорость света, рассчитанная по таблицам 1675 года, при удалении Земли от Юпитера, составила: 22 300 км/с.

Средняя скорость света на этих пяти измерительных участках составила: 44 500 км/с.

На трёх измерительных участках (в 1673 году, при удалении Земли от Юпитера; в 1677 году, при приближении и удалении Земли) определить скорость света методом Рёмера невозможно вследствие того, что изменение истинного периода обращения спутника на этих участках превышало наблюдаемое изменение периода обращения спутника, связанное с конечной скоростью света.

4. Метод Рёмера предполагает постоянство истинного периода обращения спутника, но в действительности это условие не выполняется. Истинный период обращения спутника изменяется и закон этого изменения не достаточно известен. По этой причине метод Рёмера не может быть точным методом. Однако, порядок величины скорости света, по результатам пяти успешных измерений, определяется достаточно надёжно. Скорость света на измерительных участках, где её определял Рёмер и где ускорение гравитационного поля Солнца примерно равно $0,06 \text{ м/с}^2$, составляет несколько десятков тысяч километров в секунду. Что на порядок меньше общепринятого значения скорости света, измеренного у поверхности Земли, где ускорение гравитационного поля Земли равно $9,81 \text{ м/с}^2$.

Таким образом, сравнение результатов измерения скорости света методом Рёмера в слабом гравитационном поле, с результатами измерения скорости света у земной поверхности в сравнительно сильном гравитационном поле, позволяет предположить, что скорость света зависит от параметров гравитационного поля, в котором распространяется свет.

5. По двум точкам ($g=0,06 \text{ м/с}^2$, $c=44\,500 \text{ км/с}$ и $g=9,81 \text{ м/с}^2$, $c=300\,000 \text{ км/с}$) нелинейную функцию зависимости скорости света от параметров гравитационного поля не построить. Функцию эту нужно определять опытным путём, применяя методы более надёжные, чем метод Рёмера. И, наверное, первое значение этой функции, которое сейчас наиболее актуально - это значение скорости света вблизи поверхности Луны. Знание скорости света вблизи лунной поверхности, позволит вычислить ошибку радиовысотомера при определении высоты посадочной орбиты станции Луна-25 и тем самым позволит определить одну из причин катастрофы станции.

5. Литература

1. *«Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l'Académie Royale des Sciences»*, *Journal des Sçavans*: 233–36, 1676
2. *«A demonstration concerning the motion of light, communicated from Paris, in the Journal des Scavans, and here made English»*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London T. 12*: 893–94, 1677
3. THE HISTORY OF C By Erling Paulsen/Википедия/измерение скорости света Рёмером.
4. С.Р. Филонович «Самая большая скорость» Библиотечка «КВАНТ» выпуск 27, Москва «Наука» 1983 г.
5. «Классики физической науки» Г.М. Голин, С.П. Филонович, Москва «ВШ» 1989
6. Льюис Марио «История физики» Москва «Мир» 1970 г.
7. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. Пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2003.