



Historia y didáctica sobre la medición de la velocidad de la luz

Rafael Girola Schneider*

Abstract

This work aims to show how, starting from the practical problem of determining the geographic longitude, Ole Roemer was able to demonstrate that light has a finite speed. His way of proceeding and the impact of his verification will be analyzed from a historical perspective, strengthening the scientific recognition of Roemer as the first person to measure the speed of light, one of the fundamental constants.

Through a teaching sequence, aimed at students of a Physics teaching course, the Roemer method will be recreated, using software tools to understand its most important aspects.

Keywords: Light, measurement, magnitude, eclipse, Roemer

Resumen

Este trabajo pretende exponer cómo, a partir del problema práctico de la determinación de la longitud geográfica, Ole Roemer pudo demostrar que la luz tiene una velocidad finita. Se analizará desde una mirada histórica, su forma de proceder y la repercusión que tuvo su comprobación, fortaleciendo el reconocimiento científico a Roemer como la primera persona en medir la velocidad de la luz, una de las constantes fundamentales.

A través de una secuencia didáctica, dirigida a los alumnos de un profesorado de Física, se recreará el método de Roemer, utilizando herramientas de software para comprender sus aspectos más destacados.

Palabras clave: Luz, medición, magnitud, eclipse, Roemer

* Universidad Nacional de Tres de Febrero.

I. Fundamentación

Este trabajo fue pensado para ser abordado en la asignatura Astronomía II, correspondiente al cuarto año del Profesorado de Física, del Instituto Héctor Medici, El Palomar. En el mismo, nos proponemos utilizar la historia de la Astronomía como estrategia motivacional, para valorar las posibilidades que posee como integradora de saberes, mostrando cómo se llegó a la determinación de la velocidad de la luz, de manera fortuita.

El recorte histórico nos remite a un problema a resolver de índole cartográfico: localizar longitudes en el mar, cuestión crucial para la navegación en el siglo XVI, por una creciente mortandad debido a naufragios.

En 1676 Ole Roemer produjo un cambio paradigmático en el escenario científico de la época: demostró que la luz poseía una velocidad finita.

Como sabemos, la velocidad de la luz afecta las observaciones astronómicas. En efecto, dado que la luz viaja a una velocidad finita, cuando observamos objetos celestes, la luz que emana de ellos ha tardado tiempo en llegar hasta nosotros, y en realidad, estamos viendo cómo eran en el pasado.

A partir de este hecho histórico relevante podemos conseguir aprendizajes significativos, a través de una selección de secuencias didácticas que serán resueltas desde la Física Fundamental, la Física Aplicada y la Tecnología.

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) proporcionan herramientas de software para su uso en el aula. El programa Stellarium (Chéreau, 2004) permite simular los movimientos de objetos astronómicos en el cielo. Usando este instrumento como posibilidad didáctica, aportaremos a la comprensión de problemas abstractos para darles un encuadre concreto.

II. Objetivos generales

- Comprender la evolución histórica de la Astronomía: explorar cómo la percepción y el conocimiento sobre los astros han cambiado a lo largo del tiempo.

- Valorar la importancia de la Astronomía como disciplina integradora: destacar cómo conecta diferentes áreas del saber, como la historia, la física, la matemática y la tecnología.
- Motivar el interés por la ciencia y la exploración del cosmos: utilizar hechos históricos para inspirar a los estudiantes a explorar más allá de nuestro planeta.
- Ejercitar destrezas en el abordaje de temas complejos.
- Integrar la tecnología como herramienta de aprendizaje.

III. Objetivos específicos

Analizar los hitos históricos en la determinación de la velocidad de la luz:

- Estudiando los experimentos y descubrimientos que llevaron a la estimación de la velocidad de la luz.
- Relacionando hitos astronómicos relevantes con los avances en la tecnología y la comprensión científica.
- Diseñar secuencias didácticas basadas en la historia de la Astronomía:
- Creando actividades que exploren conceptos astronómicos desde la Física Fundamental (como la ley de gravitación universal de Newton).
- Integrando la Física Aplicada (óptica y mecánica celeste) en las secuencias didácticas.
- Utilizando las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) para visualizar datos astronómicos y simular observaciones, como por ejemplo Stellarium.

IV. Introducción

A lo largo de la historia las propiedades de la luz fueron un tema de discusión particularmente su velocidad, considerada por mucho tiempo como instantánea o infinita. Diferentes estudiosos, sumaron sus esfuerzos para calcular la magnitud de la velocidad de la luz a través de varios experimentos.

En este trabajo queremos destacar cómo se llega a la determinación de la velocidad de la luz de manera fortuita.

El problema para resolver en aquel momento era localizar longitudes en el mar, para tratar de reducir la cantidad de naufragios. Utilizando la observación simultánea del mismo eclipse de una luna por su planeta anfitrión, desde dos lugares distintos de la Tierra, se logró obtener la diferencia de longitud geográfica de esas ubicaciones.

Roemer encontró que la ocurrencia horaria de ese evento variaba durante el año, dependiendo de la posición relativa que tuvieran la Tierra, el Sol y Júpiter. Así comprobó que la luz debía recorrer una distancia mayor, cuando la Tierra estaba más alejada y esto determinaba una diferencia de tiempo.

En este contexto, se realizará una recreación de la experiencia de Roemer para la medición de la velocidad de la luz.

V. Desarrollo

El docente expondrá a los alumnos el marco teórico y brindará definiciones sobre términos astronómicos a medida que vayan surgiendo en el relato, acompañadas de contenido audiovisual que permita comprender los conceptos más abstractos. Por ejemplo: se usará este método para mostrar la ocultación del satélite Ío por parte del planeta Júpiter y los desplazamientos en sus respectivas órbitas de la Tierra y Júpiter alrededor del Sol.

A partir del uso del simulador Stellarium, el cual todos los alumnos deberán tenerlo instalado en su celular, el docente dará indicaciones para que cada uno pueda lograr las actividades planteadas en la secuencia didáctica. Por ejemplo, visualizar la posición de objetos celestes en sus celulares, localizar el planeta Júpiter y su satélite Ío, recrear sus movimientos, etc.



Como dinámica se procederá a formar grupos de 5 integrantes. Basados en el marco teórico, realizarán las actividades propuestas con las herramientas informáticas propuestas, resolviendo los cálculos de manera práctica.

Al final, se dará una puesta en común en el pizarrón, para que de esta forma se logre un aprendizaje colaborativo y significativo, y al mismo tiempo haya una coevaluación.

VI. Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones fueron extraídos del Glosario Astronómico del Planetario “Galileo Galilei” (CABA, Argentina):

- **Planeta.** Cuerpo en órbita alrededor del Sol. Los planetas interiores tienen sus órbitas entre el Sol y la Tierra. Los exteriores circulan alrededor del Sol después de la órbita de la Tierra. Suelen tener satélites girando a su alrededor.
- **Conjunción.** Posición de un planeta que se ubica alineado visualmente con el Sol. Cuando un planeta exterior (Júpiter, por ejemplo) está en conjunción, ocupa su punto orbital más alejado de la Tierra. Sólo los planetas interiores (Mercurio y Venus) pueden estar en conjunción “inferior”, es decir, cuando están alineados entre la Tierra y el Sol. Por otra parte, cuando esos mismos planetas están del otro lado del Sol se habla de conjunción “superior”.
- **Oposición.** Alineación de un planeta exterior con la Tierra en el momento en el que se encuentra opuesto al Sol, con respecto a nuestro planeta.
- **Eclipse.** Cubrimiento total o parcial de un astro por otro. Ejemplo: un eclipse de Sol ocurre cuando la Luna se interpone entre nuestra estrella y la Tierra. También ocurre un eclipse cuando la sombra de un planeta, oculta una de sus lunas. Sinónimo: ocultación

VII. El reconocimiento fortuito de la existencia del valor de la velocidad de la luz a partir de la medición de eclipses para determinar longitudes en el mar

Galileo, descubridor de los cuatro principales satélites de Júpiter, fue el primero en proponer utilizar su movimiento como un reloj natural y universal que permitiera situarse en longitud en el globo terráqueo. La longitud es una medida angular que indica la distancia este-oeste desde un punto de referencia. Se suponía que este método serviría para la localización de longitudes en el mar, una cuestión crucial en la era de la navegación transoceánica. Desafortunadamente, nunca pudo usarse de manera efectiva debido a la falta de un dispositivo de observación adecuado (Beaubois, 2018). Este tema será retomado más tarde por Cassini.

A principios del siglo XVII, dos de los más importantes científicos de ese entonces, Johannes Kepler y René Descartes, habían sostenido que la propagación de la luz era instantánea y que, por consiguiente, su velocidad era infinita. El prestigio de la física de Descartes, la más importante antes de Isaac Newton, había convencido a la mayor parte de los científicos de la Europa continental (Beaubois, 2018).

Sin embargo, Galileo consideraba que la propagación de la luz no era instantánea, y se le atribuye que “en 1638, realizó el primer intento de medir la velocidad de la luz. Él y un ayudante sostenían lámparas que tapaban y destapaban a voluntad. Ubicados a bastante distancia, uno de ellos destapaba su lámpara y, en cuanto el otro veía la luz, destapaba la suya.



Figura 1. Experimento de Galileo. Imagen ilustrativa publicada en 2015 en cienciahoy.org.ar por Alejandro Cassini.

Dividiendo dos veces la distancia que los separaba por el tiempo transcurrido desde que el primero destapaba su lámpara hasta que recibía la luz del otro, se obtenía la velocidad de la luz. Galileo escribió del experimento: Si no es instantánea, al menos es velocísima. No es una sorpresa, dado que para arrancar y parar el reloj utilizamos alrededor de una décima de segundo, Galileo y su ayudante deberían haber estado separados unos 15.000km (más de un tercio del perímetro de la Tierra en el ecuador) para notar algún efecto” (Cassini, 2015).

“Gracias a Christian Huygens, que en 1657 acababa de desarrollar su reloj de péndulo, el estudio de los eclipses de los satélites jovianos fue retomado en 1664 por Jean-Dominique Cassini para elaborar tablas astronómicas más precisas y realizar así mediciones geográficas menos defectuosas. Para ello, Cassini presentó su método para determinar las diferencias de longitud en la Tierra mediante la observación simultánea del mismo eclipse en dos lugares” (Beaubois, 2018).

Mediante el método Cassini, en 1667 los astrónomos de la Academia de París buscaron determinar la diferencia de longitud entre París y el desaparecido observatorio Tycho Brahe en Hveen, Dinamarca (Observatorio de Uraniborg). Para poder utilizar correctamente las antiguas observaciones de Tycho Brahe, Jean Picard fue encargado de visitar Uraniborg, mientras Cassini permanecía en el Observatorio de París para observar al mismo tiempo las ocultaciones de Ío (Beaubois, 2018). En Uraniborg Picard tuvo como ayudante al astrónomo danés Ole Roemer, quien ya trabajaba para el rey de Dinamarca, revisando y copiando las observaciones de Tycho Brahe (Beaubois, 2018).

VIII. Metodo de Roemer – Hallazgo de la existencia de la velocidad de la luz

“En 1676 Roemer, observó que el eclipse de Ío, una de las lunas de Júpiter, se retrasaba a medida que la Tierra se alejaba de Júpiter y se adelantaba al acercarse. Tomando como criterio que las velocidades orbitales de las lunas de Júpiter no podían depender de la distancia a la Tierra dedujo que el cambio en las velocidades se debía a la distancia mayor que la luz debía recorrer cuando la Tierra estaba más alejada” (Cassini, 2015).

O sea, tardaba más cuando la Tierra y Júpiter estaban más separados.

Al igual que Cassini, Roemer se dio cuenta de que la duración de la revolución del satélite era más corta, medida a partir de ocultaciones, que obtenida a partir de las emersiones, y esto independientemente de la posición de Júpiter en su órbita (Beaubois, 2018).

Tenemos en el planteamiento del experimento de Roemer lo siguiente: el punto A representa al Sol, el punto B a Júpiter y el punto C a su primer satélite (Ío) que se mueve en dirección a la sombra de Júpiter y después aparecerá otra vez de la sombra en el punto D, mientras que E, F, G, H, L y K denotan la localización de la Tierra en diferentes puntos de la órbita alrededor del Sol.

Se manifiesta que, si la luz necesita un tiempo para recorrer la distancia LK, el satélite será visto más tarde en D que si la Tierra hubiera permanecido en K, de modo que la revolución de este satélite, así observada por las emersiones, se retrasará tanto tiempo como habrá demorado la luz en pasar de L a K, y que por el contrario las revoluciones de las ocultaciones aparecerán tanto más acortadas, como las de las emersiones parecían alargadas (Beaubois, 2018).

“Roemer propone que estas desigualdades se atribuyen al hecho de que la luz necesita tiempo para cruzar el intervalo adicional LK debido al movimiento de la Tierra durante las revoluciones del satélite” (Beaubois, 2018).

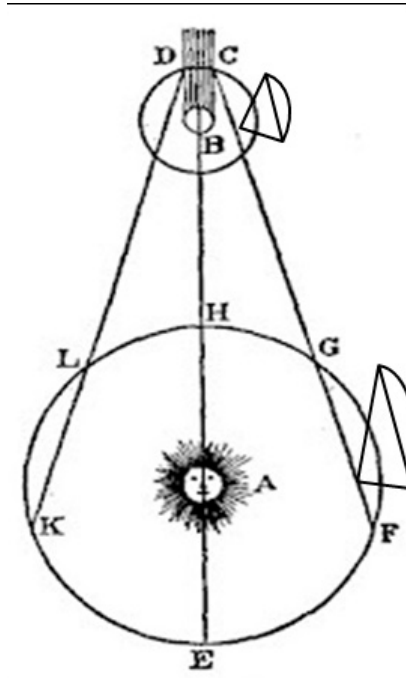


Figura 2. Ilustración de Ole Roemer, en su artículo de 1676 sobre la medición de la velocidad de la luz. Posiciones del Sol, la Tierra y Júpiter.

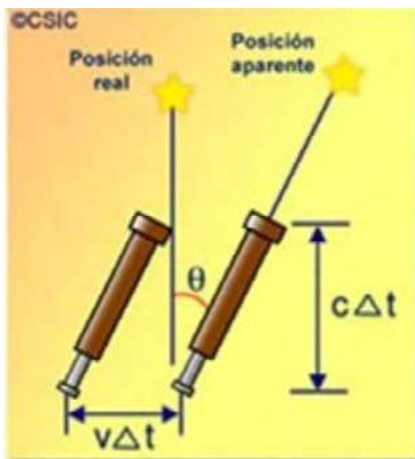
Fuente Wikipedia. Se agregaron flechas para indicar el sentido de las órbitas

En lugar de concluir a una velocidad infinita, como Descartes dedujo del análisis que había hecho del estudio de un eclipse lunar, Roemer sugiere aumentar el número de revoluciones observadas, cuyo acumulado permita obtener un tiempo perfectamente mensurable. Llega así al resultado crucial de que la luz tarda 22 minutos en cruzar el diámetro de la órbita terrestre y, por tanto, que la luz tiene un “movimiento sucesivo”, y no instantáneo (No quedan evidencias de cómo obtuvo estos 22 minutos; hoy sabemos que el valor aproximado es 16,5 minutos). Pero en ningún momento entrega un valor numérico de esta velocidad (Beaubois, 2018).

¿Por qué? Mirando la literatura, vemos que se dan varias razones: debido a que la importancia de la demostración residía únicamente en el hecho de que la velocidad era finita, o que el diámetro de la órbita de la Tierra sólo se conocía con una gran imprecisión, resultaba inútil deducir un valor para la velocidad de la luz; o bien porque la velocidad parecía inconcebiblemente grande. Cualquiera que sea la verdadera razón, el hecho es que Roemer nunca propuso un valor para la velocidad de la luz, en el sentido en que la entendemos ahora (Beaubois, 2018).

IX. Polémica de Cassini-Roemer

Cuando Cassini estableció sus tablas, se dio cuenta de que los períodos de los satélites contenían desviaciones de una regularidad que se suponía se derivaba de las leyes de Kepler. Además de una primera irregularidad debida a la excentricidad de la órbita de la Tierra y Júpiter, detectó una segunda en agosto de 1675, y propuso una explicación en términos de “movimiento sucesivo de la luz”, es decir, suponiendo una velocidad finita de la luz. Esta desigualdad “parece”, dice, “provenir del hecho de que la luz tarda algún tiempo en llegar desde el satélite hasta nosotros, y que tarda aproximadamente de diez a once minutos en recorrer un espacio igual a la mitad del diámetro de la órbita terrestre” (Beaubois, 2018). Pero luego pensó que no se debía a eso sino a que había una falta de exactitud en las medidas. Mientras, Roemer comprobó que se trataba de que existía una distancia mayor que la luz debía recorrer cuando la Tierra estaba más alejada y esto determina una diferencia de tiempo. El logro de Roemer no fue aceptado universalmente hasta el descubrimiento de Bradley de la aberración de las estrellas.



Aberración de la luz

Es la inclinación necesaria para que el rayo de luz que entra por la apertura del telescopio alcance su fondo

Figura 3. HeyserCoronel. Medidas de La Luz. <https://es.slideshare.net>. Imagen del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.

“El físico inglés James Bradley en 1728, estudiando la paralaje de la estrella Gamma Draconis, observó un desplazamiento de la posición de la estrella con la época del año que no era consistente con la idea de paralaje (cambio de posición aparente en la esfera celeste debida al cambio de posición de la Tierra después de seis meses). Propuso que la observación respondía al cambio de posición y velocidad de la Tierra y al hecho de que la luz de la estrella tenía una velocidad finita. Denominó al efecto aberración estelar (analogía con la lluvia) y resultó, aproximadamente, igual al cociente entre la velocidad de la Tierra en su órbita y la velocidad de la luz” (Cassini, 2015).

“Bradley conocía la velocidad de la Tierra alrededor del Sol y podía medir las aberraciones estelares. Concluyó que la luz tardaba 8 minutos y 12 segundos en atravesar el radio de la órbita terrestre, pero, al igual que Roemer, no ofreció ningún valor numérico para la velocidad de la luz. El tiempo calculado por Bradley es extraordinariamente preciso y sólo difiere en 7 segundos del valor actual. La velocidad de la luz que resulta utilizando los datos actuales para el radio terrestre es de 304.060 km/s” (Cassini, 2015).

“En 1849 el físico francés Armand Fizeau hizo con la luz lo que se hace para medir velocidades balísticas. La hizo pasar por una rueda dentada, viajar 8,63 km, reflejarse en un espejo y volver a la rueda en el mismo lugar. Para una rueda con 100 indentaciones, por ejemplo, que gire a 100 revoluciones por segundo, un diente ocupa el lugar del anterior luego de 0,1m/s. Cuando la luz reflejada se bloquea al aumentar la velocidad de la rueda, algo que deduce a partir de la interferencia con la luz incidente, significa que la distancia recorrida ida y vuelta dividida por el tiempo que le lleva a un engranaje tapar a la reflejada corresponde a la velocidad de la luz. Fizeau, curiosamente, expresó el valor en unidades antiguas: 70.948 leguas de 25 por grado por segundo, pero de sus datos se infiere un valor exacto de 313.274 km/s, una velocidad que, según sus propias palabras, es un poco diferente de la que es admitida por los astrónomos” (Cassini, 2015).

*El ángulo de la inclinación del paraguas para no mojarme
depende de la razón de mi velocidad a la de la lluvia*



Figura 3. Heyser Coronel. Medidas de La Luz. es.slideshare.net.
Ilustración de EIMundo.es

Entonces en el primer tercio del siglo XVIII, la finitud de la velocidad de la luz ya no estaba en duda y su valor aceptado rondaba los 300.000 km/s. El valor aceptado hoy para la velocidad de la luz en el vacío es 299.792 km/s (NIST).

X. Actividades para trabajar en el aula

Previo a realizar la actividad y como material de apoyo, se propone visualizar el siguiente link <https://www.youtube.com/watch?v=m3WY-FY9GmRo> y reflexionar:

- a. A lo largo de la historia ¿qué métodos se han utilizado para medir la luz? Comentar en que consistían y representarlos gráficamente.
- b. ¿Cómo plantearías el cálculo matemático para determinar la velocidad de la luz con los datos determinados por Roemer?
- c. ¿Cómo hoy se calcula la velocidad de la luz?

Secuencia didáctica: Recreación de la experiencia de Roemer para medición de la velocidad de luz.

Objetivos

1. Hacer una identificación de aspectos astronómicos, sobre las posiciones de oposición y conjunción, entre la Tierra, el Sol y Júpiter. Definir qué es un eclipse de Ío.
2. Recrear cómo fueron las mediciones de tiempos de Roemer comparadas con las efemérides realizadas por Cassini.
3. Visualizar cuándo se da la ocultación y la emersión de Ío, a través de la aplicación Stellarium desde el celular.
4. Verificar numéricamente que cada vez tarda más dicha luna en surgir de la sombra proyectada por el planeta, de modo que cuando haya transcurrido medio año, en el que la Tierra recorrió 180° y Júpiter los $15,18^\circ$ de sus respectivas órbitas, se llega a constatar un retraso global de 900 segundos con respecto al periodo inicial de Ío, en la situación de oposición. Con este valor y la diferencia entre las distancias de

oposición y conjunción, podemos calcular la velocidad de la luz. Tratar de analizar estos valores desde su ubicación astronómica con el Stellarium y con apoyo de diagramas en el pizarrón

Marco teórico que servirá de apoyo en nuestra tarea

“De los cuatro satélites galileanos, Ío, Ganímedes, Europa y Calisto, es el primero el que orbita más próximo al gigante gaseoso, con un radio medio orbital dado por $r_{io} = 4,216 \times 10^8 m$, y un movimiento que se desarrolla en el mismo plano en el que se mueve Júpiter en su órbita alrededor del Sol” (Chinea, 2013).

“El planeta Júpiter tiene, en su órbita alrededor del Sol, un radio orbital aproximado dado por $r_j = 5,203 UA$, y un periodo $P_j = 11,86 años$. El radio del planeta es de $R_j = 71398 km$ y su masa de $M = 1,901 \times 10^{27} kg$ ” (Chinea, 2013).

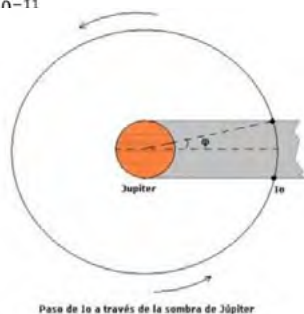
Nuestro planeta, la Tierra, tiene asimismo un radio orbital de 1 UA y un periodo de 365,2 días ($r_T = 1 UA$, $P_T = 365,2 días$). Con estos datos podemos determinar la velocidad, periodo, etc. de Ío en su movimiento alrededor de Júpiter. Si M es la masa de Júpiter, la velocidad de Ío se obtiene de forma inmediata:

$m \frac{v^2}{r_{io}} = G \frac{Mxm}{r_{io}^2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r_{io}}}$, y esto nos permite obtener su periodo orbital:

$$v = \frac{2\pi r_{io}}{P_{io}} \rightarrow P_{io} = \frac{2\pi r_{io}}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{r_{io}^3}{GM}} = 2\pi \sqrt{\frac{(4.216 \times 10^8)^3}{6,67 \times 10^{-11}}}$$

$$= 152748,4 seg = 1,769 días$$

Periodo orbital de Ío: 152748,4 segundos
(Chinea, 2013).



“La luz incidente del Sol sobre la esfera del planeta Júpiter proyecta una sombra que es atravesada por Ío en su órbita alrededor del planeta. El ancho de esta sombra coincide con el diámetro del planeta” (Chinea, 2013), como vemos en la figura contigua, donde está representado por el ángulo 2φ el cual se puede calcular como sigue:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_j}{r_{io}} \rightarrow \varphi = \arctg \left(\frac{R_j}{r_{io}} \right) = \arctg \left[\frac{7,1398 \times 10^7}{4,216 \times 10^8} \right] = 0,1678$$

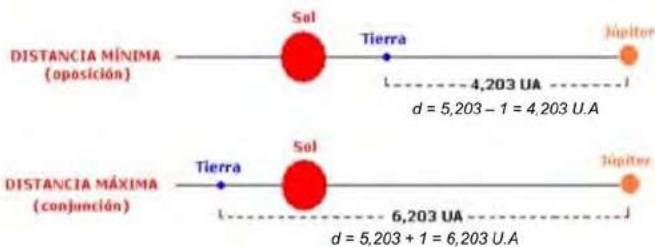
Podemos determinar el tiempo t que tarda Ío en atravesar la sombra, mediante una proporción con el periodo orbital de Ío:

$$\frac{t}{P_{io}} = \frac{2\varphi}{2\pi} \rightarrow t = \frac{P_{io}}{2\pi} 2\varphi = \frac{1,769 \times 24 \times 60 \times 60}{2\pi} \times 2 \times 0,1678 = 8164 \text{ s} = 136,07 \text{ min} = 2,27 \text{ hs}$$

(Chinea, 2013)

Distancia entre la Tierra y Júpiter

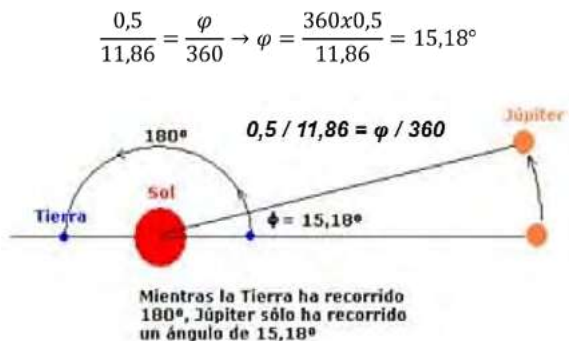
“Puesto que nuestro planeta dista del Sol una unidad astronómica (1 UA), mientras que Júpiter dista del Sol 5,203 UA, resulta que la menor distancia entre la Tierra y Júpiter corresponde a la situación en la que Júpiter se encuentra en oposición, ya que en este caso tal distancia será $d_{Tj} = 5,203 - 1 = 4,203$ UA. La mayor distancia corresponde al caso en el que Júpiter esté en conjunción, situación en la que tal distancia sería $d_{Tj} = 5,203 + 1 = 6,203$ UA. La distancia d entre ambos astros, es, por consiguiente, $4,203 \text{ UA} \leq d \leq 6,203 \text{ UA}$ ” (Chinea, 2013).



SITUACION DE DISTANCIA MÍNIMA Y DE DISTANCIA MÁXIMA ENTRE LOS PLANETAS TIERRA Y JÚPITER

Situación de los planetas Tierra y Júpiter medio año después de la situación de oposición:

“Medio año después de la situación en la que la distancia es mínima (oposición) la Tierra ha recorrido la mitad de su periodo orbital, esto es, se ha desplazado recorriendo un ángulo de 180° , mientras que Júpiter, cuyo periodo es mucho más largo, habrá recorrido un ángulo φ , menor, que podemos determinar de manera sencilla, como la proporción entre 0,5 años (Tierra) y 11,86 años que es el periodo de tiempo en el que el planeta gaseoso (Júpiter) recorre 360° ” (Chinea, 2013).



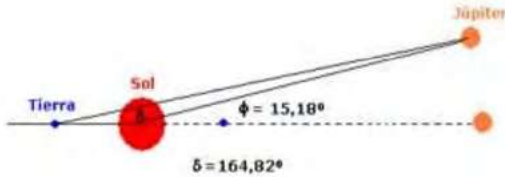
“Durante todo este tiempo, que emplea Júpiter en moverse dentro de su órbita un ángulo de $15,18^\circ$ y la Tierra un ángulo de 180° , un observador situado en nuestro planeta vería a Ío surgir desde la sombra de Júpiter, aunque no le vería en el momento de su entrada en la zona de sombra, pues se lo impide la posición intermedia de Júpiter” (Chinea, 2013).

“Si bien en la situación inicial de oposición el periodo de Ío observado es de 152748,4 segundos, a medida que la Tierra se va alejando de Júpiter el observador que mide los instantes en que Ío surge desde la sombra de Júpiter en sus sucesivas órbitas alrededor del planeta, observa que la diferencia de tiempos va aumentando, esto es, que cada vez tarda más dicha luna en surgir de la sombra proyectada por el planeta, de modo que cuando ha pasado el medio año en el que la Tierra ha recorrido los 180° y Júpiter los $15,8^\circ$, se llega a constatar un retraso global con respecto al periodo inicial de Ío en la situación de oposición, de unos 990 segundos. Si esos

990 segundos de retraso se deben a que al alejarse cada vez más la Tierra la luz tarda más en llegar, bastará encontrar la distancia entre la Tierra y Júpiter en este momento para poder calcular la velocidad de la luz, pues si encontramos que la distancia entre ambos planetas en la fase de oposición era la mínima, 4,203 UA, y ahora encontramos que la distancia es d , la velocidad de la luz se calcularía como el cociente de dividir la variación de distancia por la variación de tiempo:

$$c = \frac{d - 4,203}{990}$$

Veamos, por consiguiente, cómo calcular la distancia entre ambos planetas cuando ha pasado medio año desde la situación de oposición. En el triángulo Tierra-Sol-Júpiter se conocen dos lados y el ángulo comprendido entre ambos lados: lado Tierra-Sol, $TS=1$ UA, lado Sol-Júpiter, $SJ=5,203$ UA, ángulo δ comprendido = suplementario de ϕ " (Chinea, 2013).



Aplicando a dicho triángulo el teorema del coseno, podemos hallar la distancia d entre la Tierra y Júpiter:

$$d^2 = TS^2 + SJ^2 - 2 \times TS \times SJ \times \cos \delta$$

y obtenemos:

$$d^2 = 1^2 + 5,203^2 - 2 \times 5,203 \times \cos(164,82) = 28,0712 + 10,406 \times 0,965290 = 38,1160$$

resultando que es $d = 6,174$ UA

será, como hemos indicado antes:

$$c = \frac{d - 4,203}{990} = \frac{6,174 - 4,203}{990} = \frac{1,917 \text{ UA}}{990 \text{ s}} = \frac{1,917 \times 15 \times 10^7 \text{ km}}{990} \frac{\text{km}}{\text{s}} = 2,98636 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

(se ha redondeado el valor de la unidad astronómica en 150 millones de kilómetros: $1 \text{ UA} = 15 \times 10^7 \text{ km}$)" (Chinea, 2013).

XI. Conclusiones

Con este trabajo se pretende que el alumno de profesorado conozca algunos métodos usados en diferentes momentos históricos para lograr discernir una de las constantes fundamentales de la Física, la velocidad de la luz.

Conocer la magnitud de la velocidad de la luz resultó esencial para estudiar los objetos del cielo, determinar su distancia, desplazamiento, magnitud real, entre otras características.

Al relatar cómo se logró descubrir algo tan elusivo, vemos cómo la ciencia evoluciona en la manera de abordar los problemas, propiciando la aparición de nuevas herramientas y métodos, para obtener información del mundo que nos rodea. A su vez su accionar, genera cambios en toda la sociedad.

Con ello se busca motivar a los futuros profesores, a investigar y generar Proyectos para llevarlos a la práctica en sus aulas.

Si bien no hay recetas para elaborar estrategias, podemos reflexionar como docentes, lo expresado por el pedagogo Víctor Flores: “Apreciar la situación a partir de las perspectivas de todos los actores. Proponer objetivos que estén al alcance de los recursos disponibles. Conocer lo que puede aportar cada uno de los actores. Prepararse ante la incertidumbre en lugar de hallarse en el lugar de las certezas” (Flores, 1993).

Referencias

- Beaubois, F. (2018). Roemer y la velocidad de la luz. *BibNum, textes fondateurs de la science*.
- Cassini, A. P. (2015). Un experimento crucial de Galileo sobre la velocidad de la luz. *Ciencia Hoy*, ISSN: 1666-5171, Volumen 24, número 143, 45. Obtenido de <https://cienciahoy.org.ar/un-experimento-crucial-de-galileo-sobre-la-velocidad-de-la-luz/>
- Chéreau, F. (22 de noviembre de 2004). *Stellarium*. Obtenido de <https://stellarium.org/es/>

China, C. (2013). *La medición de la velocidad de la luz por Röemer*. Obtenido de <http://casanchi.org/fis/roemerluz01.pdf>

Flores, V. (1993). *Principios básicos para el diseño de estrategias. Curso de Capacitación y Actualización para Planificadores de la Educación*. Obtenido del Instituto Superior de Formación Docente y Técnico Profesional Vinchina, La Rioja, Argentina: https://ifdvinchina-lrj.infed.edu.ar/sitio/wp-content/uploads/2020/09/GSTN_Flores_Unidad_5.pdf

Nist, N. I. (s.f.). *Fundamental Physical Constants*. Obtenido de <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c>

Planetario Galileo Galilei, B. A. (s.f.). *Glosario Astronómico. Versión V2-RC1*. Obtenido de <https://planetario.buenosaires.gob.ar/glosario-astronomico>

