

XXIII FERIA NACIONAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

"¿PODEMOS MEDIR LA VELOCIDAD DE  
LA LUZ?"

ÁREA: CIENCIAS EXACTAS

SUBÁREA: ASTRONOMÍA

NIVEL: "F"

BADANO, Sebastián

SARIO, Luís Nicolás

Asesor: DE LAURENTI, Miguel Ángel

CLUB de CIENCIAS "Ing. ÁNGEL DI PALMA"

29 N° 575 - (6600) MERCEDES - Prov. de BUENOS AIRES

AÑO 1999

# "¿PODEMOS MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ?"

BADANO, SEBASTIAN, 4° año "A", 16 AÑOS, [1]

SARIO, LUIS NICOLÁS, 5° año 3°, 17 AÑOS, [2]

CAMBRES, MATÍAS ROBERTO, 5° año "A", 17 AÑOS, [1]

**Club de Ciencias "Ing. Angel Di Palma"**

**Mercedes - Buenos Aires - Argentina**

**Asesor** : Miguel Ángel De Laurenti,

Director, Observatorio Astronómico Municipal Mercedes [3]

[1] E.E.T. N° 1 , calle 31 N° 51 (6600) Mercedes (Bs. As.)

[2] E. N. S. media N°5, calle 29 N°874 (6600) Mercedes (Bs. As.)

[3] Observatorio Astronómico Municipal Mercedes, 29 N° 575 (6600)  
Mercedes (Bs. As.)

# ÍNDICE

Resumen.....	pág. 4
Introducción.....	5
I) Antecedentes.....	5
II) Nuestra motivación.....	8
III) Objetivos.....	9
IV) El método de Röemer.....	9
a) Su teoría.....	10
b) Un problema.....	12
c) Una solución.....	12
d)Un problema observacional..	13
VI) Hipótesis.....	14
Desarrollo.....	15
a) Equipo y técnica utilizada.....	15
b) Cronograma.....	17
c) Observaciones.....	18
d) Reducción, resultado final.....	21
Conclusiones.....	26
Bibliografía.....	28
Agradecimientos.....	29
Apéndice (figuras/gráficos, tablas, etc.).....	30

## **RESUMEN**

Se explica la dificultad para medir la velocidad de la luz; se comentan distintos métodos para hallarla y sus resultados, así como por qué es una constante universal y cómo se sabe su valor "verdadero". La importancia de su determinación o, al menos, demostrar que esta velocidad es finita motivó a los autores a buscar un método sencillo de aplicar y asequible a una institución media. Se optó así por el histórico método de Röemer para una determinación astronómica de esta velocidad, que se pasa a describir tal cual figura en la literatura clásica, descripción que encontramos simplificada e insuficiente para su aplicación real. Luego se aplica este método con las propias observaciones de los autores, que dan un valor de 221077 km/seg; se comentan fuentes de error y una posible mejora, que sin embargo no bastaría para un valor exacto, por el método en sí; pero satisface el objetivo de demostrar una velocidad de la luz finita sin recurrir a un equipo inaccesible y corrobora la hipótesis sobre la correcta técnica observacional.

# INTRODUCCIÓN

## I) ANTECEDENTES:

La velocidad de la luz es finita? Esta pregunta tiene el problema de exigir una medición de una velocidad que, si no es infinita, es muy rápida. Sabido es que se puede expresar la velocidad en la forma  $v = e/t$  (el espacio recorrido en un cierto tiempo). Como la velocidad de la luz es de casi 300000 km/seg (en el vacío), su medición en un laboratorio no es sencilla por métodos clásicos: o se dispone de enormes distancias (recordemos que la luz tarda en llegar a la Luna poco más de un segundo), o se miden tiempos extremadamente cortos y con gran precisión. O, claro está, se recurre a un método tecnológicamente elaborado, moderno (y fuera de las posibilidades de los autores).

Parece ser que fue Galileo (aprox. 1600) quien primero intentó (o propuso) una medición de la velocidad de la luz. Su experiencia consistió en colocar a dos personas muy alejadas una de otra y provistas de sendas lámparas. A una señal, uno descubría su lámpara y el otro hacía lo mismo al ver la luz. Galileo trataba de medir el tiempo transcurrido, obviamente sin éxito (además, no tenía reloj!). Pero el sólo intentarlo señala un salto mental: todo el mundo suponía una velocidad infinita, Galileo trató de comprobarlo empíricamente y a la vez demuestra con el intento sus dudas con respecto al saber "académico" impuesto, lo que no dejaría de traerle sus problemas. Esta experiencia se repitió años después (1667), con igual resultado. El problema es obvio, el tiempo a medir es del orden de la millonésima del segundo.

Entonces, surge la necesidad de tomar el otro camino: usar grandes distancias que permitan a su vez usar tiempos susceptibles de ser medidos con un error relativamente bajo. Estas grandes distancias las da la astronomía, y la medición de los tiempos está asociada a la periodicidad de muchos fenómenos celestes. Este es el método propuesto por el danés Olaf Röemer (1675), en base a observaciones de un satélite (Io) de Júpiter. Más abajo se lo explicará en detalle, por ser el método que se utilizó.

No es este el único método astronómico que fue utilizado para medir la velocidad de la luz. En 1728 el inglés James Bradley usó su descubrimiento del fenómeno de la aberración de la luz para hacer una medición por cierto mucho más precisa, dado que arrojó un valor de 304000 km/seg (!) contra los poco más de 200000 km/seg del método de Röemer. Pero Bradley realizó mediciones que los autores no pueden hacer dado su naturaleza muy precisa (medir un ángulo de pocos segundos de arco a lo largo de varios meses), por lo que se descartó.

Es interesante señalar que parece no haber constancia de que Röemer hiciera su experiencia u observación [Sears, 1958. p.13]. Dedujo un valor según lo que se conocía en la época sobre las dimensiones del sistema solar. Pero también pudo desanimarse por las incertidumbres inherentes al método, como se pudo comprobar...

Los intentos posteriores para medir la velocidad de la luz no son astronómicos, y no se discutirán en detalle. Se mencionará el método de Fizeau (1849) o de la rueda dentada, que exigía un espacio de casi 9 km para los dos componentes de su instrumento y dio un valor de 313300 km/seg; fue mejorado por Foucault en 1862 en el método del espejo giratorio, con un resultado de 298000 km/seg ( $\pm$  500). Ambos métodos sufrieron sucesivas mejoras (Cornu, 1876; Michelson, 1880, 1883, 1926 y 1932; Newcomb, 1883) que dieron un

valor cada vez más cercano al "real" y con menor error.

Y cuál es este valor "verdadero", como se lo sabe? Y, principalmente, por qué medir la velocidad de la luz? Qué la hace tan especial e importante? Más adelante se comentará la motivación por realizar este trabajo. Al realizar un curso de astronomía en el observatorio de Mercedes se habló de la luz y de su velocidad; el valor de ésta, se explicó que surge de la teoría electromagnética de J. C. Maxwell. De sus ecuaciones surge que la luz es una onda electromagnética, análoga a las ondas de radio, rayos X y  $\gamma$ , microondas, UV e IR, etc.; diferenciándose éstas de la luz visible en su frecuencia (ciclos/segundo) o en su longitud de onda. Y de estas mismas ecuaciones surge su velocidad: 299792.458 km/seg en el vacío. Se dice en el vacío porque la velocidad de la luz depende del medio en que se transmite: en el aire es ligeramente inferior, en el agua baja más, en el vidrio también y así sucesivamente. El índice de refracción, tan usado en óptica, es justamente un cociente entre las velocidades de la luz entre dos medios en que se transmite (p. ej. aire y vidrio). Pero esto mismo (una velocidad dada, que es afectada por el medio) se puede decir de cualquier cosa; el sonido, p. ej. (que NO es una onda electromagnética). Qué hace tan especial la luz, entonces?

El problema ahora se complica. El profesor señaló dos cosas: 1) La teoría especial de la relatividad indica que la velocidad de la luz es una constante universal, muy probablemente la única; esto se traduce en que su velocidad no se ve afectada por la velocidad de la fuente que lo emite, para cualquier observador, en cualquier marco de referencia; y 2) la mecánica cuántica dice que la naturaleza de la luz es dual, lo que significa que su comportamiento se puede explicar como onda o como partícula. En realidad el tema es mucho más complicado que todo esto (encima las dos teorías, relatividad y cuántica, no se pueden unir) y quizás no signifique otra cosa que

nuestra incapacidad de representarnos el mundo físico en ese nivel; pero esto es lo único que se pudo sacar en claro.

Volviendo a la determinación de la velocidad de la luz (experimentalmente), se señalará para finalizar que Rosa y Dorsey (1906) obtuvieron 299781 km/seg ( $\pm 10$ ) usando la teoría electromagnética; los valores más acertados y con el menor error fueron: Bergstrand (1950) 299792.7 ( $\pm 0.25$ ) con un geodímetro; Bol y Hansen (1950) 299789.3 ( $\pm 0.4$ ) con cavidad de microondas; Froome (1952) 299792.6 ( $\pm 0.7$ ) con un interferómetro de microondas; Edge (1956) 299792.9 ( $\pm 0.2$ ); etc. (todos los valores en km/seg). Es de señalar que se sacaron estos valores de una literatura clásica, sin ver el método, y a solo efecto de destacar el valor cada vez más preciso obtenido.

## II) NUESTRA MOTIVACIÓN:

Los integrantes del grupo que realizaron este trabajo son estudiantes de secundario que además participaron de cursos de astronomía y astrofísica, brindados por el Observatorio Astronómico y la Dirección de Cultura de la Municipalidad de Mercedes. La idea surgió inicialmente como una buena excusa para aplicar algo de lo que se había aprendido, y para regalarse un tiempo dedicado a una actividad que tanto los atrae. Este trabajo permite llegar a algo realmente importante (como es hallar mediante los propios medios la velocidad de la luz, o al menos demostrar que es una velocidad finita), sin esfuerzos económicos, y con un método adecuado como para que un grupo de jóvenes estudiantes amantes del cielo puedan desarrollar sin mayores problemas.

Por otra parte, al mencionar en el curso este método, y ya con algo de experiencia en observación, se comentó con el profesor que no se puede realizar tal cual se lo comenta en los libros de texto, y que Röemer tiene que haber enfrentado dificultades prácticas que dan



un valor errado; entonces se propuso realizar este trabajo, que consiste en repetir el método de Röemer con los siguientes objetivos.

### III) OBJETIVOS:

1) Verificar si, y cómo, se puede realizar en forma práctica, sencilla (sin "cajas negras"), económica (contando con un telescopio adecuado para observación visual) y relativamente rápida (un curso escolar, si Júpiter está visible en él) el método de Röemer para una determinación astronómica de la velocidad de la luz; o, al menos, demostrar una velocidad finita;

2) Encontrar fuentes de error;

3) Ver cómo se puede mejorar el método, o sea disminuir el error.

Por lo tanto, antes del desarrollo de las observaciones, se pasará a describir el método (teórico) en sí, tal cual aparece en la literatura "clásica". Luego se comentará cómo se lo puede hacer en forma práctica, y sus problemas "a priori".

### IV) EL MÉTODO DE RÖEMER:

a) **Su teoría:** Es muy sencilla. Obsérvese la fig.1 del apéndice. Se puede ver (NO a escala) el Sol, la Tierra en su órbita y Júpiter en la suya. Uno de los satélites de Júpiter, Io, orbita en torno a éste. Júpiter tiene muchos satélites, más de una docena, pero sólo cuatro son fáciles de ver con una pequeña ayuda óptica (fueron descubiertos por Galileo y son, en orden: Io, Europa, Ganímedes y Calixto). En esta primera situación, con la Tierra en oposición con Júpiter, es decir ambos del mismo lado del Sol en sus respectivas órbitas (aprox. mínima distancia, se recuerda que las órbitas son

elípticas), es posible trazar una línea que une Sol, Tierra, Júpiter. Las órbitas están casi en un mismo plano, con una diferencia de sólo poco más de 1°.

Supongamos que se observa con un telescopio Júpiter, y se ve que Io se oculta tras el planeta. Se toma el tiempo (instante de la ocultación). Luego se lo ve reaparecer. En total, tarda en dar una vuelta en torno a Júpiter algo menos de 2 días, definiendo su

Período sinódico (Io) = 1<sup>d</sup>.76986049 , dato que se extrae de tablas.

Si se tiene el instante de una ocultación (Ti), y se sabe el período (P), podemos predecir, después de varias vueltas ("épocas" = E) cuando será el instante de una ocultación dada (Ocf), haciendo de esta manera una "efemérides". El cálculo, claro, es:

$$Ocf = Ti + (P * E)$$

Es muy importante que las unidades sean iguales; se expresará todo en días, al igual que la fecha: para esto se usa el Día Juliano (JD), que es un calendario en que sólo se cuentan los días en forma consecutiva, sin meses ni años. Se expresa en tiempo medio (el de nuestros relojes) y comienza a mediodía del 1 de Enero de 4713 A. de C. (JD=1). La fecha y hora se expresa como JD y fracción decimal del día, lo que lo hace muy útil para los cálculos astronómicos; además es muy práctico por que la fecha cambia a mediodía y no en el transcurso de la noche. Se puede calcular con un programa, o sacarlo de un manual astronómico. Así, para 1999, el JD es 2451178.5 + día del año (.5 por la medianoche). Luego se reduce hora, minuto y segundo a día y se suma a este valor.

Volviendo al método, se obtiene un Ti en oposición; se sabe P y

cuántos E transcurren pasados, p. ej., 6 meses. Se puede predecir una ocultación de Io cuando la Tierra esté en conjunción con Júpiter, que es la situación mostrada en la fig. 2 (los planetas en sus órbitas, a ambos lados del Sol).

Röemer realizó estas observaciones (quería usarlas como "reloj" en alta mar, donde no funcionaban los de péndulo, para así hallar la longitud geográfica de la embarcación), pero encontró que su efemérides nunca era exacta: el satélite se atrasaba (retardaba) en ocultarse en la conjunción, respecto del cálculo realizado con la observación en oposición; o, a la inversa, se adelantaba en oposición respecto de la conjunción. Y en cualquier posición intermedia, también tenía un atraso (o adelanto) proporcional y gradual.

Röemer explicó esto argumentando que en el caso de la conjunción la luz debía atravesar el diámetro de la órbita terrestre (aprox. 300 000 000 km, o sea unos 17 minutos-luz), y que por este motivo se veía el fenómeno más tarde. Para ser claros: el fenómeno se produce puntualmente, pero la luz tarda más en llegar al observador mostrando esa ocultación. Röemer dedujo un valor de aprox. 21 minutos, lo que daría una velocidad de aprox. 210000 km/seg.

b) **Un problema:** Observar un planeta exterior en oposición es muy fácil: se lo encuentra alto en el cielo de la noche y es visible durante todo el transcurso de la misma. En cambio, en conjunción, está literalmente del otro lado del Sol, o al menos angularmente "pegado", y no se lo puede ver. Entonces, se debe observarlo antes de la conjunción (o después). Pero entonces el punto de vista desde la Tierra es distinto (véase fig. 3), y los tiempos medidos deben corregirse, para lo cual es imprescindible conocer este ángulo, o diferencia entre las visuales en uno y otro caso. Además, cerca de la conjunción es breve el tiempo en el que está visible el planeta, y

esto generalmente cerca del horizonte, lo que dificulta la observación y la hace menos precisa.

c) **Una solución:** Obviamente, se debe observar 1) cuando es de noche o al menos lo suficientemente oscuro para distinguir los satélites en forma nítida; además, 2) en el momento de la ocultación (por ser más objetiva que una reaparición) y que 3) sea esta por el limbo, es decir por el borde del planeta y no en su cono de sombra proyectado (para mayor certeza y uniformidad). Si a todas estas limitaciones se agrega la conveniencia de 4) observar con el objeto alto sobre el horizonte para tener una mayor calidad de imagen porque se observa visualmente (es decir sin un detector acoplado al telescopio, sólo mirando a través de él) y minimizar los efectos de la refracción (la desviación del haz de luz por las capas de la atmósfera, muy notable cerca del horizonte), y 5) obvio, con cielo despejado, hay pocas circunstancias favorables para la observación y casi ninguna cerca de la conjunción.

Entonces se debe observar bastante lejos de ella y el problema de los ángulos es más grave. Pero afortunadamente el valor de este es igual al llamado ángulo de fase (véase fig.4), que es el formado entre el Sol y la Tierra visto desde Júpiter (para nuestro caso) y aparece tabulado en distintas efemérides. Entonces se utiliza para practicar la corrección indicada al tiempo de observación.

Una idea de la corrección, que surge de las observaciones de los autores, la da el hecho de que se vio el eclipse 15 minutos **antes** y no **después**; o sea, haciendo una efemérides sin ajustar se hubiera obtenido un valor **negativo** de la velocidad de la luz.

d) **Un problema observacional:** Es evidente que aún en el mejor de los casos la atmósfera terrestre desmejora la imagen. El

inconveniente de este método, efectuado con observaciones visuales, es la incerteza y subjetividad de la apreciación del instante de la ocultación de Io, agravada como se verá en el desarrollo siguiente en la conjunción. Esta es la principal fuente de error, difícil de solucionar sin una alta tecnología. Otras cuestiones (la atmósfera de Júpiter, la órbita de Io, refracción, latitud heliocéntrica, etc.) son mucho menores frente a este problema.

## HIPÓTESIS

1) Es posible realizar el método de Röemer de determinación astronómica de la velocidad de la luz, observando cerca de la oposición y antes de la conjunción, pero teniendo en cuenta el distinto "punto de vista". Para ello, basta corregir por ese ángulo, que coincide con el de fase.

2) El error principal en este tipo de observaciones visuales se debe a la calidad de la imagen, máxime cerca de la conjunción; introduciendo una cierta subjetividad en la apreciación del observador del instante de ocultación. Esto hace que el valor obtenido de la velocidad tenga una diferencia con el verdadero de no menos del 20%; pero así y todo muestra una velocidad finita. Es muy poco lo que se ganaría con reiteradas observaciones, que llevarían por lo menos dos o tres años, y no cumpliría uno de los objetivos (que se haga en un curso escolar).

3) Se puede objetivizar la observación con equipo de más alta tecnología y en mejores condiciones de observación. Pero esto no concuerda con el objetivo de usar instrumental accesible.

## DESARROLLO

En este apartado se describirá el equipo usado para efectuar las observaciones y la técnica utilizada; el cronograma de dichas observaciones; las observaciones en sí (recolección de datos) y su posterior reducción para unificar tiempos, etc.; y los resultados obtenidos, con una estima de error (elaboración de datos). Un detalle cronológico de todo esto se puede ver en la "carpeta de campo", partes de la misma (diagramas, hoja de cálculo final) se puede ver reproducida en el apéndice.

a) **Equipo y técnica utilizados:** La observaciones se realizaron visualmente con un telescopio Cassegrain de 0.6 m de diámetro y 12 m de distancia focal ( $f/d=20$ ), con un ocular de 100 mm de distancia focal lo que implica 120 aumentos y ocasionalmente con un ocular de 35 mm (aumentos , aprox. 350) dependiendo de la calidad de la noche. Si bien más aumentos dan una imagen mayor en tamaño, lo que favorece apreciar la ocultación, de nada sirve esto si la imagen es mala por turbulencia, etc. El telescopio posee una montura ecuatorial en horquilla y su correspondiente mecanismo de relojería para compensar la rotación de la tierra, así como servomotores para movimientos finos, enfoque, etc., y círculos de lectura de coordenadas ecuatoriales para enfocar un astro cuando no es visible, lo que fue de gran utilidad para observar cerca de la conjunción. Pertenece al Observatorio Astronómico Municipal de Mercedes (Bs. As) y está alojado en su correspondiente cúpula situada en coordenadas: Long. 03h 57m 44s W y Lat. 34° 37' 55" S.

Se pensó en un primer momento observar con ese telescopio y a la vez con otro auxiliar, un refractor de 0.08 m a  $f/d=12$  y 40 aumentos, para poder comparar. Pero pruebas realizadas el 15/09/98 a 0 hs. UT demostraron que la imagen en este último es demasiado pequeña para una observación útil. Se estima que un telescopio de 0.15 a 0.20 m con un  $f/d \Rightarrow 10$  y 100 a 150 aumentos es suficiente; y menos aún con una buena calidad de imagen proporcionada por buena calidad óptica y buen cielo (siempre observando visualmente).

Se aclara que se expresarán todas las fechas y horas de acá en más en UT, Tiempo Universal, igual a hora en el meridiano de Greenwich, para uniformar (luego expresaremos estos tiempos en JD, como se señala en pág. 10 y 11, para tener todo en unidades iguales: días). Así, 0 hs. UT del 15/09/98 son las 21 hs. del 14/09/98 HLA, hora legal argentina; o sea una diferencia de 3 hs.

El brillo de Júpiter es mucho mayor que el de sus satélites. Se pensó enmascarar el planeta, pero esto presenta muchas dificultades y el inconveniente de que oculte mal. Esta idea fue pensada originalmente porque el telescopio tiene un fotómetro fotoeléctrico como periférico (se lo usa para estudiar estrellas variables) y se pensó que se podría medir cuando se oculta Io de una manera más exacta con una fotometría continua, rápida (no muy precisa, claro). Pero el brillo de Júpiter es demasiado para este instrumento y no se cuenta con un filtro adecuado para reducirlo y enmascarar en el fotómetro implica una modificación compleja e incierta; por lo que hubo que descartar todo esto.

Para tomar el tiempo se usó un cronómetro (al principio dos, por que no se tenía idea de cuanto tardaba todo el proceso) ajustado con señales horarias.

b) **Cronograma:** Los autores se dividieron en dos equipos, uno de



ellos (Badano y Cambres) observando (Badano observa y Cambres toma tiempos); Sario se encargaría de las reducciones, etc.

Para comprender mejor cuándo se pueden realizar las observaciones, es necesario recordar en que circunstancias se pueden hacer:

1) Las predicciones del fenómeno se sacan de "Efemérides astronómica" (98 y 99) y de "Sky & Telescope" (para cada mes). Un programa comercial da la configuración de los satélites para ese momento (es decir donde están los 4 visibles).

2) De las predicciones se seleccionan las que son ocultación (es decir tras el limbo (borde) y no en la sombra, por ser más uniformes) y sólo en el caso de desaparición (no reaparición) por ser más objetivo, nos parece, en la toma de tiempos.

3) Y de estas, sólo se observará de noche, lo más despejada y oscura posible y con el objeto alto en el cielo (nada fácil, por no decir imposible, en la conjunción), para minimizar los efectos de la atmósfera.

4) Se tratará de observar dos ocultaciones seguidas (o casi, si no es posible por lo indicado en (3)) para obtener un período y así compararlo con el tabulado y tener una idea del error que se puede cometer.

De todo lo expuesto, queda claro que no es cuestión de pegarse al telescopio, apuntar a Júpiter y ver qué pasa. Dicho sea de paso, por que Júpiter, e Io? Porque Io tiene el menor período de los cuatro; y si bien se puede usar Saturno, sus anillos introducen otra interferencia en la observación. De los demás, o están alejados (Urano, Neptuno) o sus satélites son casi invisibles (Marte). Y por la razón histórica del método original.

Volviendo a la planificación de las observaciones:

- La oposición sería el 15/09/98 a las 21 hs. Sin fenómenos visibles.
- Las siguientes aptas son 23/09/98, 01:35 y  
30/09/98, 03:19.

Estas se observaron y se extrajo un período observacional, además de tener un  $T_i$  (el de la primera, más cerca de la oposición) para el cálculo de efemérides. Luego restaba esperar a aprox. mediados o fines de Febrero para la última observación, dado que la conjunción es 01/04/99 a las 0 hs. Se intentaron otras observaciones a fines de Diciembre y principios de Enero, por seguridad, pero por mal clima no fueron útiles. Por cierto, se puede esperar hasta después de la conjunción, operando con los ángulos como se señala; o ambos, para ver si se obtiene un mejor resultado, lo que se consideró dudoso. Pero significa alargar demasiado el trabajo, y observar en las madrugadas de invierno es difícil por el clima (nieblas, etc.)

c) **Observaciones:** Nuevamente los autores se remiten a la carpeta de campo:

1) 23 de Setiembre de 1998, 00 hs. La configuración es la que se muestra en fig. 5, (a y b). Tiempo despejado, con velos tenues. Buenas imágenes. Equipo bien. El diámetro aparente de Júpiter es de unos 60" de arco, con una magnitud (medida astronómica del brillo) de aprox.

-3. Júpiter se encuentra a una declinación (distancia desde el ecuador celeste, que es la proyección del terrestre al espacio, al objeto; negativo al Sur) de  $-5^\circ$ ; y a un ángulo horario (distancia desde el meridiano del lugar de observación al objeto, proyectado al

ecuador celeste) de 2 hs. al Este (1 hs.= 15°).

A 01:05:00 se largan cronómetros. Se observa un primer contacto a 01:30:26 y el segundo (desaparición) a 01:34:48. Por lo tanto se puede tomar un tiempo medio de

**01:32:37 = JD 51079.56431**

Pero esto de tomar dos tiempos y sacar uno medio está bien en oposición, con el objeto grande y alto y un buen cielo. En conjunción NO pudo hacerse, con suerte se tomó el final. Por lo que se reserva este tiempo medio para calcular el período, y para el trabajo en sí se tomó el segundo contacto,

**JD = 51079.56583**

De tablas:

distancia T-J,  $d = 3.9709431$  UA (1 UA= dist.Tierra-Sol= 149597870 km).

ángulo de fase,  $\alpha = 1^\circ.6$

2) 30 de Septiembre de 1998, 02 hs. La configuración se muestra en fig. 6, (a y b). Tiempo despejado, con velos tenues. Buenas imágenes, equipo bien. Júpiter a declinación  $-5^\circ$  y ángulo horario  $30^m$  Oeste.

A 03:06:00 se larga cronómetro. Se observa un primer contacto a 03:14:36 y el segundo a 03:19:05, lo que da una media de

**03:16:05 = JD 51086.63669**

(esta observación es sólo para tener un período y de él estimar un error)

3) 24 de Diciembre de 1998, 00 hs. Despejado, turbulencia. Imágenes malas, equipo bien. Júpiter a  $-5^\circ$  y 4 hs W (!).

La ocultación es a aprox. 01:20:40 pero el dato es incierto y NO

SIRVE.

4) 08 de Enero de 1999, 23 hs. Nublado, visión esporádica. Imágenes malas, equipo bien. Júpiter a  $-4^\circ$  y 3.5 hs. W.

La ocultación es a aprox. 23:49:30 pero el dato es incierto y NO SIRVE.

5) 16 de Febrero de 1999, 22 hs. La configuración se ve en fig. 7, (a y b). Despejado, ligeramente velado, de día, difícil de ver. Objeto centrado por coordenadas. Se colocó trampa de luz y se cerró cúpula todo lo posible para observar mejor. Imágenes regulares, equipo bien.

AR (Júpiter) =  $00^h 05^m$  , lo que da un AH 04:40 W (en la hora sidérea tomada).

dec. " =  $-00^\circ 41'$

magnitud -2, diámetro aparente (J) 35"

**Nota:** La AR (ascensión recta) de un astro es la distancia de la proyección de este al ecuador celeste a un punto fijo sobre el mismo en una de sus intersecciones con la eclíptica (plano de la órbita terrestre) llamado punto vernal. El tiempo sidéreo (TS) es una medida de carácter angular definida como el ángulo horario (AH) de ese punto vernal (o sea marca la verdadera rotación de la tierra con respecto a las estrellas). Por lo tanto para hallar AH de un astro se resta AR de TS, con su signo; y así se lo puede hallar (utilizando también la otra coordenada, declinación, dec., de lectura directa) aunque no lo veamos a simple vista. El TS se lee de un reloj especial que hay en todo observatorio.

No se aprecian los satélites. Io se nota, mal, como un punto débil sobre el limbo (el resto de los satélites se ven aprox. 30 min. después).

A 22:30:00 se larga cronómetro. No se distingue primer contacto.  
La ocultación es a

**22:54:38 = JD 51226.45460**

de tablas:

d= 5.7520301 UA

$\beta = 6^\circ.4$

d) **Reducción y resultado final:** Los autores también se guiaron por la carpeta de campo. Se utiliza el término reducción, típicamente astronómico, en el sentido de utilizar y elaborar los datos para llegar a un resultado. Se usarán las observaciones (1) y (2) para (A): hallar un período observacional que, comparado con el tabulado, nos dará un error (o-c). ESTE NO ES EL ERROR DEL MÉTODO, sólo sirve para demostrar que los otros errores son más importantes [nota: si se hubiera usado el período tomado por los autores, la velocidad de la luz daría aprox. 10000 km/seg. (!). Se tendrían que realizar MUCHAS observaciones para mejorarlo substancialmente...].

A partir de la observación (1), y luego de realizar la (5) (dado que la (3) y (4) no sirven por su mala calidad, lo que es una lástima, porque se podrían haber comparado resultados intermedios) se elaboró una (B): efemérides, corregida por ángulo de fase, para predecir cuándo debería haberse producido la ocultación. Por último, (C): la diferencia de tiempo entre lo calculado y lo observado (el problema original de Röemer!) es debida al tiempo extra que tarda en llegar la luz a la Tierra, debido a la mayor distancia entre ésta y Júpiter; por lo que dividiendo este tiempo por ésta diferencia de distancia OBTENEMOS LA VELOCIDAD DE LA LUZ (la tabla 1 del apéndice, que es la salida de una hoja de cálculo de un soft comercial, resume este último paso). Recuérdese, nuevamente, que se expresa todo en UT,

días, y JD.

(A): Se puede hallar un período restando el JD de la obs. (1) al JD de la (2) y dividiendo por los ciclos E transcurridos, que es la cantidad de órbitas o "vueltas" que da Io en esos días, que a su vez se obtiene dividiendo la cantidad de días transcurridos entre ambas observaciones y dividiendo por el período de Io y expresando el resultado como entero. Pero se debe tener en cuenta el problema de los ángulos citado tantas veces; y además, como se quiere sacar un error, al cambiar la distancia Tierra-Júpiter en los días transcurridos, se debe corregir por tiempo-luz, que por tablas es 12 seg.. Se insiste que es para sacar un error, o mejor dicho tener una idea de el, que entre otras cosas indujo a usar el P tabulado y no el observado por los autores; señalamos esto por que el usar una corrección por tiempo luz implica saber su velocidad, que es lo que se quiere calcular...

[NOTA: Todos los datos tabulados son de "Efemérides Astronómicas, 1998"]

23/9/98,  $\_ = 1^{\circ}.6$

30/9/98,  $\_ = 3^{\circ}.1$ , ambas interpoladas. Diferencia =  $1^{\circ}.5 = 0^{\text{d}}.007374$ :

$360^{\circ} \dots \dots \dots 1P$  ( $1^{\text{d}}.76986049$ )

$1^{\circ}.5 \dots \dots \dots XP = 0^{\text{d}}.007374$

23/9/98, dist. T-J (luz) =  $33^{\text{m}}.025$

30/9/98, " " " =  $33^{\text{m}}.220$  (interpoladas). Diferencia =  $-0^{\text{m}}.195$   
(= 12 seg. a restar al primer (o-c))

30/9/98 a 03:16:50 = JD 2451086.63669 - 0.00737 = 2451086.62932.

El tiempo transcurrido entre esta observación corregida por  $\_$  y la primera, de fecha

23/9/98 a 01:32:37 (JD 2451079.56431) es:

$$2451086.62932 - 2451079.56431 = 7^{\text{d}}.06501$$

Y los ciclos transcurridos son  $7.06501 / 1.76986049 = 3.99\dots = 4$

Entonces el período observado es

$$7.06501/4 = 1^{\text{d}}.7662525,$$

y el error es:

$$(o - c) = 1^{\text{d}}.7662525 \text{ (obs.)} - 1^{\text{d}}.769860 \text{ (tab.)} = -0^{\text{d}}.003607 = -311.7 \text{ seg.}$$

Y corrigiendo por tiempo luz (12 seg.)

$$(o - c) = -311.7 - (-12) = 299.7 \text{ seg (casi 5 minutos)} = 0.2\% \text{ de P.}$$

Esta es la diferencia entre P de los autores y el real, tomando  $4E/4$ . No se puede extrapolar para más, por eso se usó el P tabulado.

La fuente de error es la observación de la ocultación: a) por nuestra atmósfera, b) por la calidad de la imagen, c) por sus distintos tamaños (opos. y conj.), y d) por que todo esto hace subjetiva la determinación del instante de ocultación al observador.

Indudablemente, una mejor calidad y uniformidad de imagen, y una determinación mas objetiva (por ejemplo con imágenes CCD rápidas e interpoladas) mejorarían mucho esto; que valga o no la pena, es otra cuestión.

(B): A partir de la observación (1)

(Ti= 51079.56583:

la final, no la media que se usó antes, véase pág. 18) y con el período tabulado P

$$P = 1^{\text{d}}.76986049,$$

se elaboró una efemérides (Of) para la observación (5), dado que se puede saber el número de ciclos E transcurridos.

$$Of = (P * E) + Ti$$

$$[E = 51226.45460 - 51079.56583 = 146.88877 / 1.76986049 = 82.99... = 83]$$

Pero se debe hacer una corrección X por \_:

$$Of = ((P * E) + Ti) - X$$

Y esta corrección es, al igual que en el caso (A):

$$\_ \text{ en la obs. (5)} = 6^{\circ}.4$$

$$\_ \text{ " " " (1)} = 1^{\circ}.6, \text{ la diferencia es } = 4^{\circ}.8 = 0^{\text{d}}.0236 = X$$

$$360^{\circ} \dots \dots \dots 1P (1^{\text{d}}.76986049)$$

$$4^{\circ}.8 \dots \dots \dots X = 0^{\text{d}}.023598139 = 0^{\text{d}}.0236$$

Substituyendo en la ec. anterior por sus valores:

$$Of = ((1.76986049 * 83) + 51079.56583) - 0.0236 = \underline{51226.44065}$$

[NOTA: en realidad es 2451226.44065; es costumbre expresar el JD sin sus dos primeras cifras para que al trabajar con la calculadora deje lugar a más cifras decimales; obvio, esto es posible si el tiempo considerado es tal que no cambie este 24 por 23 o 25, que no es el presente caso].

Esta es la predicción de los autores. Pero se observó (5) la ocultación DESPUÉS, en

$$\underline{\underline{JD 51226.45460}}$$

o sea con una diferencia

$$51226.45460 - 51226.44065 = \mathbf{0^{\text{d}}.01395},$$

y esto debido al atraso luz.

En las observaciones (1) y (5) las distancias verdaderas a Júpiter eran, respectivamente (en UA):

$$3.97094310 - 5.75203010,$$



lo que restado y pasado a km. da

266 446 821.5 km

Como  $0^{\text{d}}.01395 = 1205.2$  seg, se puede obtener un

**RESULTADO FINAL:**

$v=e/t = 266446821.5/1205.2= 221077$  km/seg = C (velocidad de la luz)

Si este valor se lo compara con el verdadero de 299792.5 km/seg., da una diferencia del 26 % (!), y es un poco mejor que el original de Röemer.

## CONCLUSIONES

La conclusión se puede resumir en una contrastación de las hipótesis planteadas:

1) Se logró repetir la experiencia del método de Röemer para una determinación astronómica de la velocidad de la luz, superando algunas dificultades prácticas que surgen de una descripción demasiado idealizada o simplificada del método. El valor obtenido, 221077 km/seg, es ligeramente mejor que el método original y se puede atribuir a un conocimiento más exacto de las dimensiones del sistema solar, pero aún así difiere un 26% del verdadero. La hipótesis de observar antes de la conjunción y corregir por ángulo de fase, fue correcta.

2) Tal cual se señaló en distintas partes de este trabajo, la principal fuente de error es la observación visual, es decir apreciar cuando el satélite se oculta y asignarle un instante preciso a este evento. La calidad de la imagen, afectada por nuestra atmósfera (y en menor medida por la de Júpiter, que da un limbo poco preciso) introduce en esta observación un cierto grado de subjetividad, máxime en la conjunción (diámetro aparente del objeto más pequeño, observación con el objeto más cercano al horizonte). Una estima de error basada en el  $(o - c)$  del período da 0.2%, lo cual es ridículo frente al error real. Es obvio que este método no puede competir con los otros (astronómicos o no, preferentemente). Pero sin duda muestra una velocidad finita de la luz, con relativamente poco esfuerzo.

3) Si bien esta dificultad de la atmósfera es insalvable para un observatorio basado en Tierra, puede mejorarse el método observando en lugares con mejor cielo y objetivizando el instante de ocultación con determinaciones basadas, p. ej., en sucesivas tomas de imágenes CCD, las cuales procesadas y eventualmente interpoladas darían un tiempo más acertado y uniforme. Por supuesto que esto no se justifica como un trabajo especial para medir la velocidad de la luz, habida cuenta de métodos mejores y siempre más precisos. **Pero siendo estos métodos de muy difícil acceso para instituciones comunes, el practicado por los autores con todas sus limitaciones permite responder a la pregunta del trabajo.**

## BIBLIOGRAFÍA

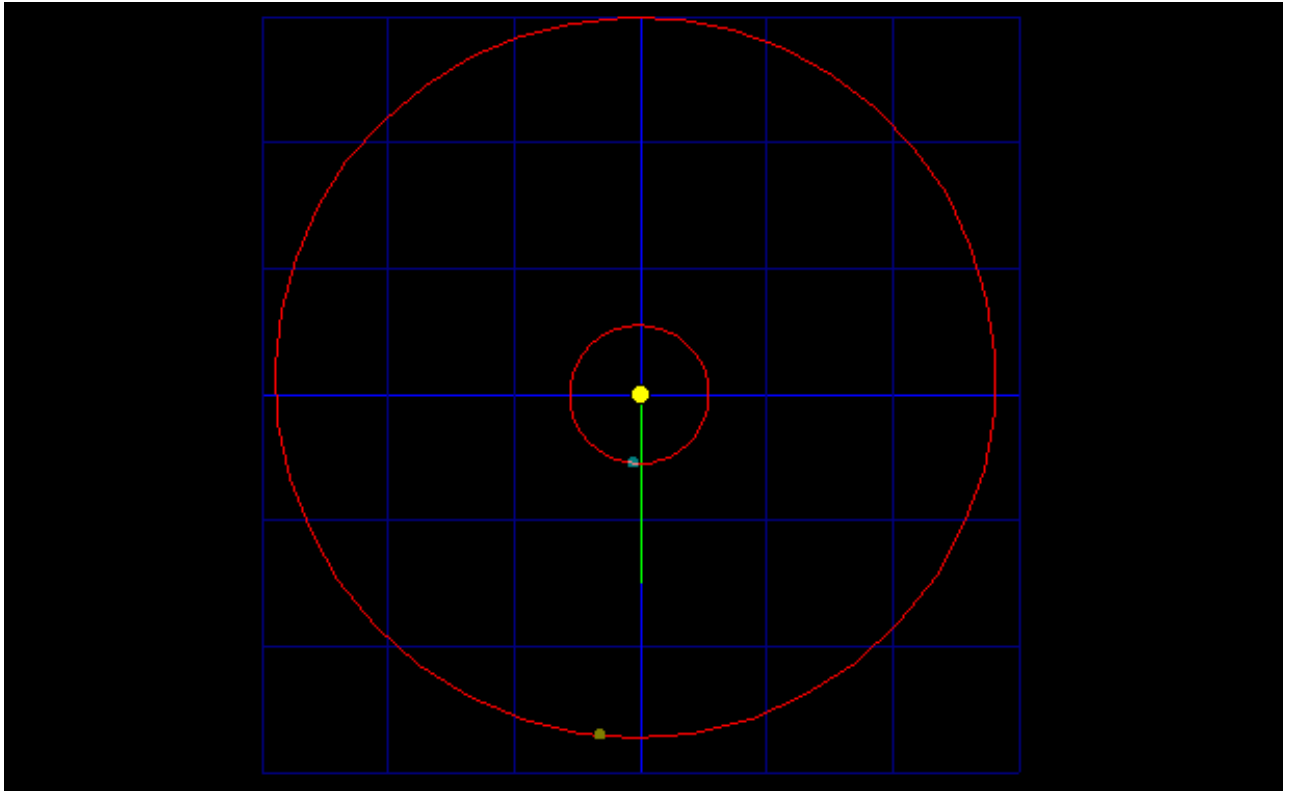
- Blackwood, O., Kelly, W., Bell, R., 1978, *Física general* (CECSA).
- De Laurenti, M., 1998 y 1999, *Manual Astronómico* (Pub. OAMM).
- Ferris, T., 1990, *La aventura del universo* (Grijalbo Mondadori SA).
- Halliday, D. y Resnick, R., 1975, *Física. Parte II* (COEPLA SRL).
- Meeus, J., 1991, *Astronomical algorithms* (Willmann-Bell, Inc).
- Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, 1998 y 1999, *Efemérides Astronómicas*.
- Sears, F. W., 1967, *Fundamentos de física. III. Óptica* (Aguilar SA ediciones).
- *Sky & Telescope*, Volúmenes 96 y 97 (Sky Publishing Corporation).
- Smith, J., 1969, *Introducción a la relatividad especial* (Reverté SA).
- Unsöld, A., 1977, *El nuevo cosmos* (Siglo XXI editores SA).
- Vorontsov-Veliamínov, B. A., 1979, *Problemas y ejercicios prácticos en astronomía* (ed. MIR).
- Walker, G., 1989, *Astronomical observations - an optical perspective* (Cambridge University Press).
- Wichmann, E., 1972, *Física cuántica* (Reverté SA).

## **AGRADECIMIENTOS**

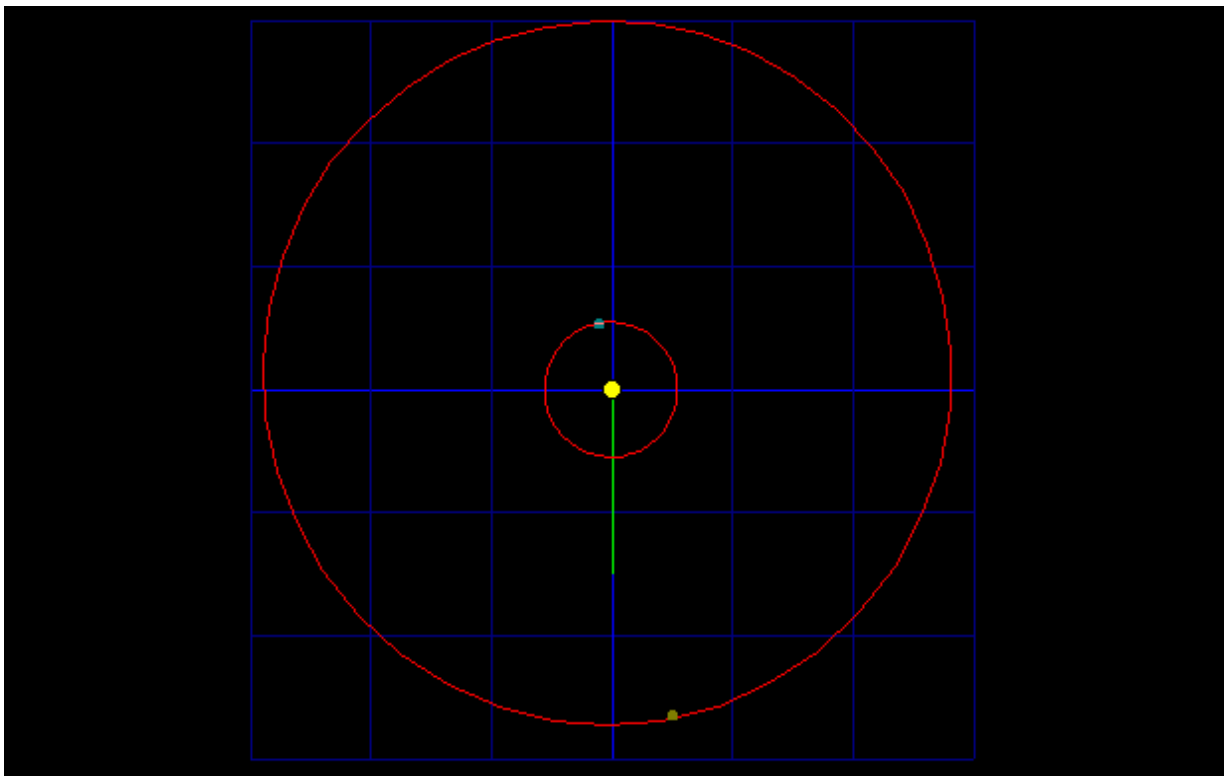
Los autores desean expresar su agradecimiento al Observatorio Astronómico dependiente de la Dirección de Cultura de la Municipalidad de Mercedes, por permitir el uso de su instrumental y biblioteca. También desean expresar su reconocimiento al Sr. Intendente, por su apoyo económico; al prof. Armando Zandanel por valiosas sugerencias; y a la E.E.T. N° 1 de Mercedes por las facilidades otorgadas para uso de talleres, equipos y materiales.

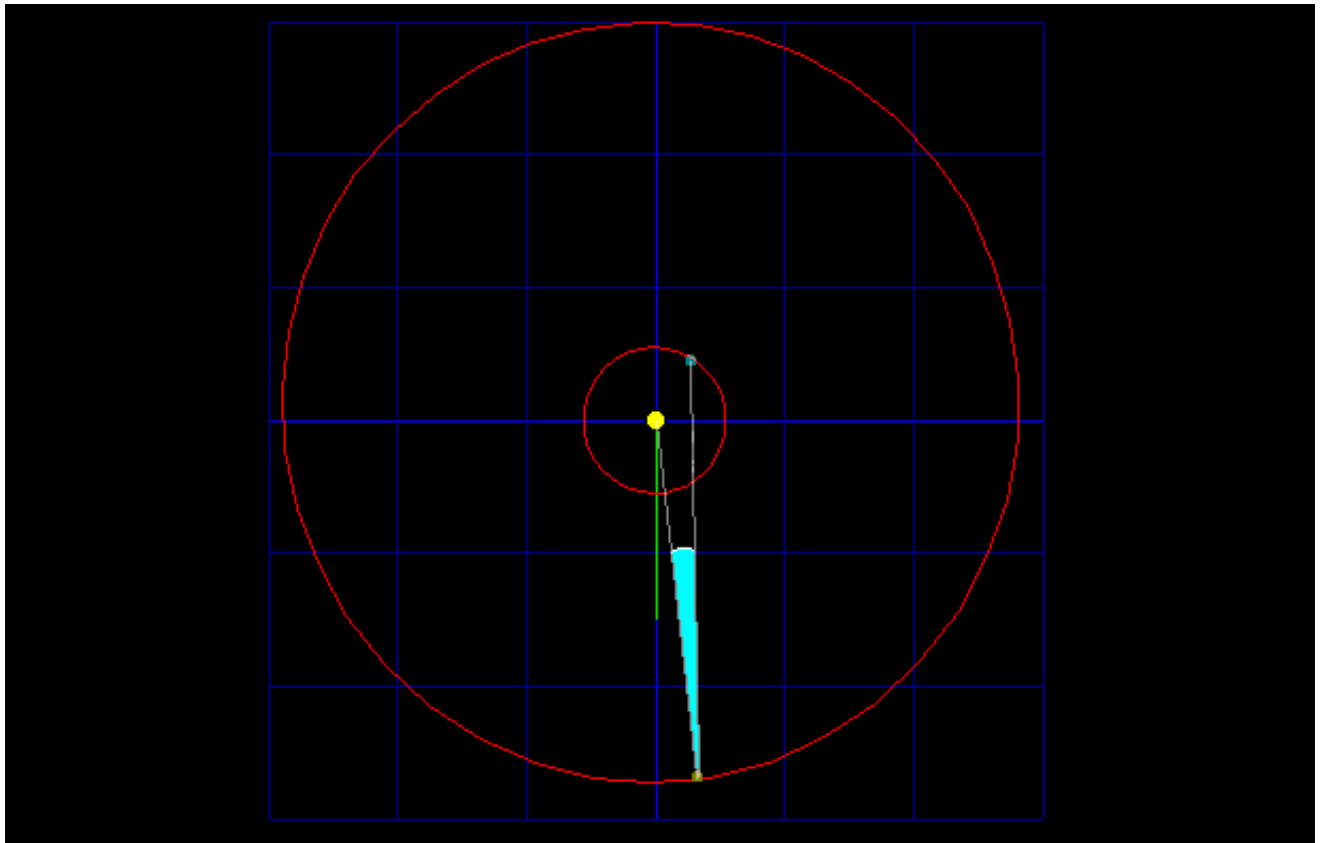
## APÉNDICES

Oposición - 16/09/98 : Sol, Tierra, Júpiter.



Conjunción - 01/04/99: Tierra, Sol, Júpiter.





Observación del 16/02/99: Tierra, Sol, Júpiter. En celeste, el ángulo de fase.