

# Experimento para determinar si la velocidad con la que nos llega la luz procedente de galaxias lejanas es mayor que la velocidad de la luz que se considera como constante.

## Resumen

El objetivo de este escrito es ilustrar cómo podría medirse la velocidad a la que llega la luz procedente de galaxias lejanas.

Existe una teoría que explica el desplazamiento al rojo de las galaxias basándose en un aumento de la velocidad de la luz. Mediante este experimento se podría corroborar o descartar dicha teoría. Nunca se ha medido la velocidad con que nos llega la luz procedente de galaxias lejanas, tal vez porque se acepta mayoritariamente la constancia de la velocidad de la luz, pero pensamos que, ya que es posible, sería interesante medirla y comprobarlo.

El experimento consiste en observar una ocultación de una galaxia lejana por parte de un planeta de nuestro sistema solar, un tránsito del planeta que se interpone entre nosotros y la galaxia. Podremos entonces comparar la velocidad de la luz procedente de la galaxia lejana con la velocidad de la luz procedente del planeta. De ser cierta la diferencia de velocidades de la luz, hará que veamos un disco negro que precede al planeta ocultando parte de la imagen de la galaxia, como luego se explicará. Sin embargo, si las velocidades son iguales no se observará nada de eso, simplemente veremos al planeta transitar sobre la galaxia.

Para explicar el mecanismo de este experimento, en primer lugar analizaremos un ejemplo nada astronómico, pero de fácil comprensión.

En segundo lugar analizaremos un ejemplo consistente en una galaxia cuya luz suponemos que nos llega al doble de “la velocidad de la luz”, y un planeta cuya luz nos llega a “la velocidad de la luz”.

En tercer lugar se analizará el experimento para cualquier galaxia y cualquier planeta, y obtendremos las ecuaciones de partida para realizar el experimento, y para interpretar sus resultados.

En cuarto lugar detallaremos el funcionamiento de la hoja de cálculo “experimento.xls”. Hoja de cálculo en formato excell, que hemos confeccionado para realizar con comodidad los cálculos necesarios para llevar a cabo el experimento.

Terminaremos con un ejemplo práctico con el planeta Marte.

## Ejemplo primero

Para hacer más comprensible el mecanismo que fundamenta el experimento, lo ilustraremos con una analogía que nada tiene que ver con la astronomía, pero que espero sirva para explicarlo.

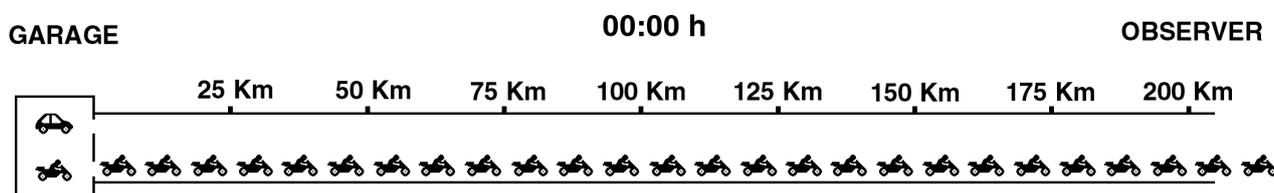
Supongamos un almacén de vehículos donde hay motos y coches, y que el almacén tiene una puerta por donde sale un solo vehículo cada segundo. Los vehículos que salen circulan a velocidad constante por una carretera recta, hasta una distancia de 200 Km, donde está situado un observador que anota los vehículos que pasan por ese lugar.

Las motos circulan a 200 Km/h y tardan 1 hora en llegar hasta el observador.

Los coches circulan a 100 Km/h y tardan 2 horas en llegar hasta el observador.

Supongamos que son las 00:00 horas, y que del almacén han estado saliendo solamente motos desde hace más de una hora, con lo cual en la carretera habrá una fila ininterrumpida de motos circulando a 200 Km/h, que se extenderá desde el almacén hasta el observador.

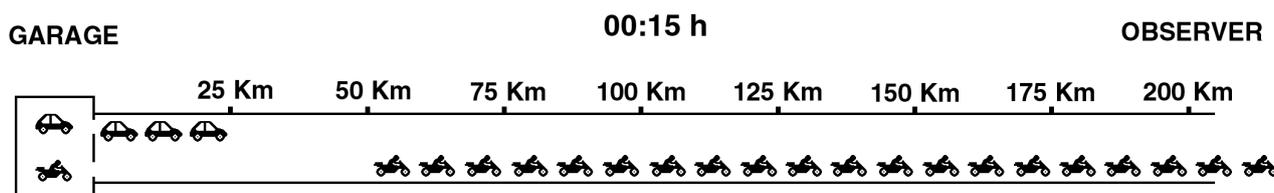
Vamos analizar el tema con la ayuda de unos dibujitos que representan la situación de la carretera en cada momento del experimento.



En este primer dibujo, correspondiente a las 00:00 horas, observamos la fila de motos de más de 200 kilómetros de larga.

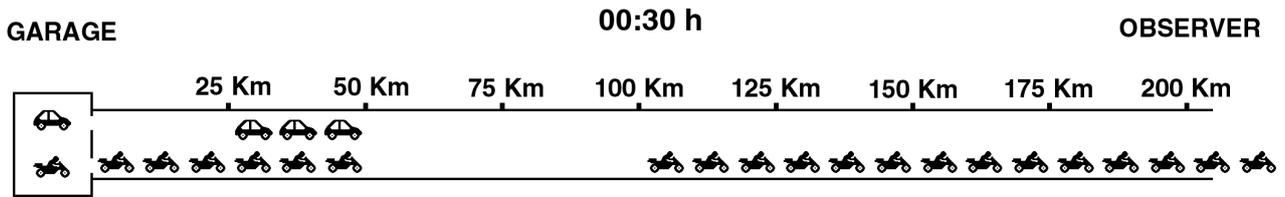
Supongamos ahora que en ese momento, las 00:00 horas, dejan de salir motos del almacén e inmediatamente empiezan a salir coches, solo coches, también a un ritmo de un coche por segundo, y que esta situación continúa durante 15 minutos. O sea que salen solo coches entre las 00:00 horas y las 00:15 horas.

Veamos el esquema de las 00:15 horas



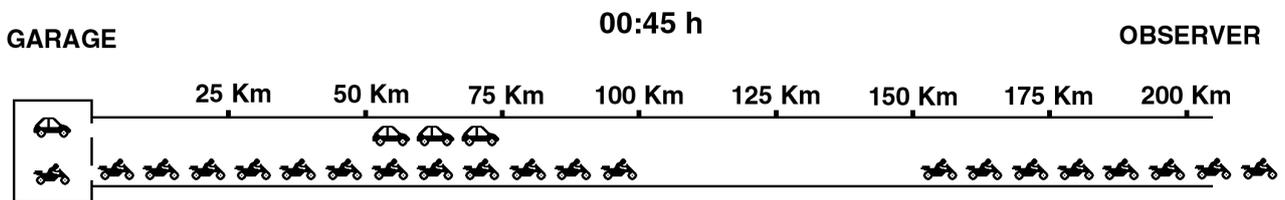
En el dibujo de las 00:15 horas, observamos como la última moto que salió, que lo hizo a las 00:00 horas, ahora va por el kilómetro 50, pues en 15 minutos recorre 50 kilómetros. El primer coche que salió, va ahora por el kilómetro 25, pues en 15 minutos recorre 25 kilómetros.

Supongamos que en este momento, a las 00:15 horas, dejan de salir coches e inmediatamente empiezan a salir solamente motos, al ritmo de siempre, una moto por segundo, y que esta situación se mantiene el resto del tiempo.

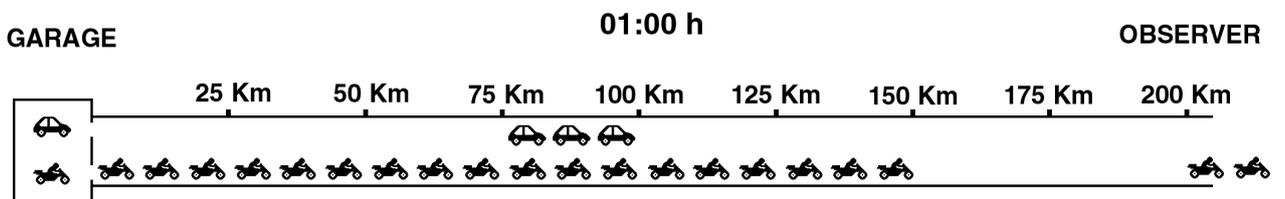


En el dibujo de las 00:30 horas, observamos como avanza el “hueco sin motos”, que en este momento está entre los kilómetros 50 y 100. La moto del kilómetro 50 es la primera moto de la segunda tanda de motos, que salió a las 00:15 horas. La moto del kilómetro 100 es la última moto de la primera tanda de motos.

La fila de coches, de longitud 25 kilómetros, avanza a 100 Km/h, y ahora está entre los kilómetros 50 y 25.

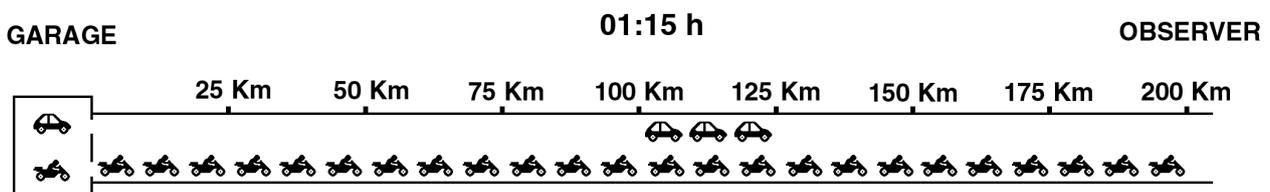


En el dibujo de las 00:45 horas se ve claramente como el hueco sin motos avanza más rápido que la fila de coches. Es lógico, pues las motos circulan a mayor velocidad.

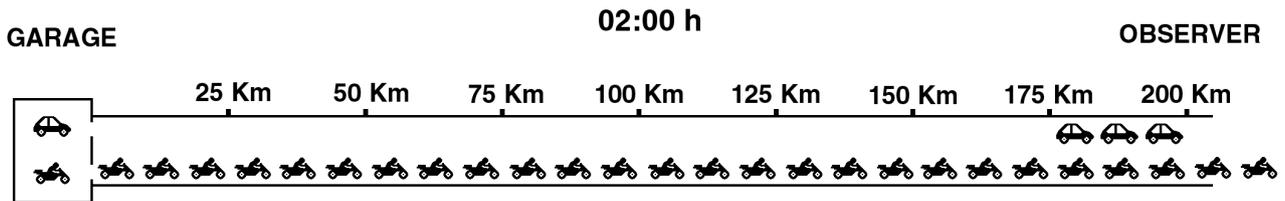
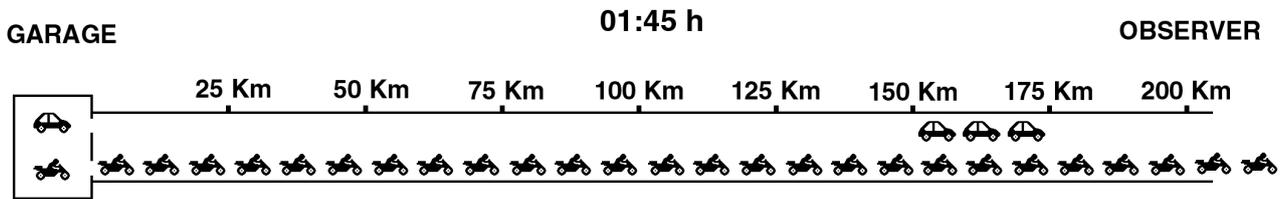
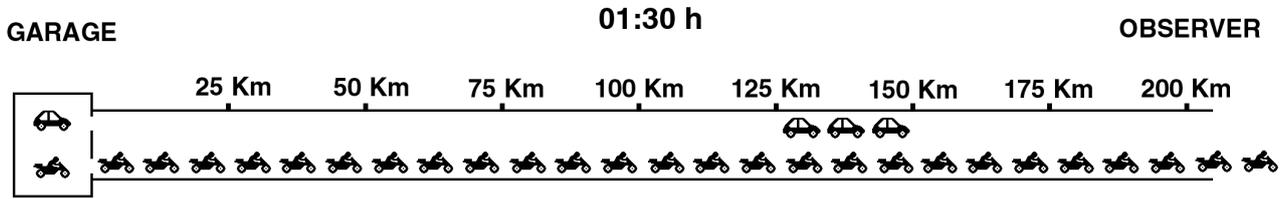


En el dibujo de las 01:00 horas, vemos como acaba de llegar al observador la última moto de la primera tanda de motos, y a partir de ese momento ya no llegará ninguna moto hasta dentro de 15 minutos. La fila de coches está entre los kilómetros 100 y 75.

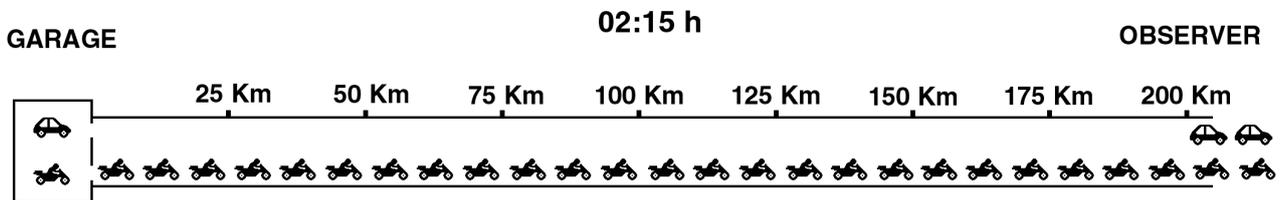
O sea que, a las 01:00 horas empieza la ausencia de vehículos de cualquier clase en la posición del observador, no pasarán ni motos ni coches, y esta ausencia durará 15 minutos, hasta las 01:15 horas.



En el dibujo de las 01:15 horas, vemos como está pasando por la posición del observador la primera moto de la segunda tanda de motos, y a partir de ese momento las motos ya no dejarán de pasar por ese lugar. La fila de coches está todavía lejos del observador.



En el dibujo de las 02:00 horas, vemos como acaba de llegar el primer coche al observador. A partir de ese momento, y durante 15 minutos, estarán pasando los coches por la posición del observador, que verá pasar simultáneamente coches y motos durante ese espacio de tiempo.

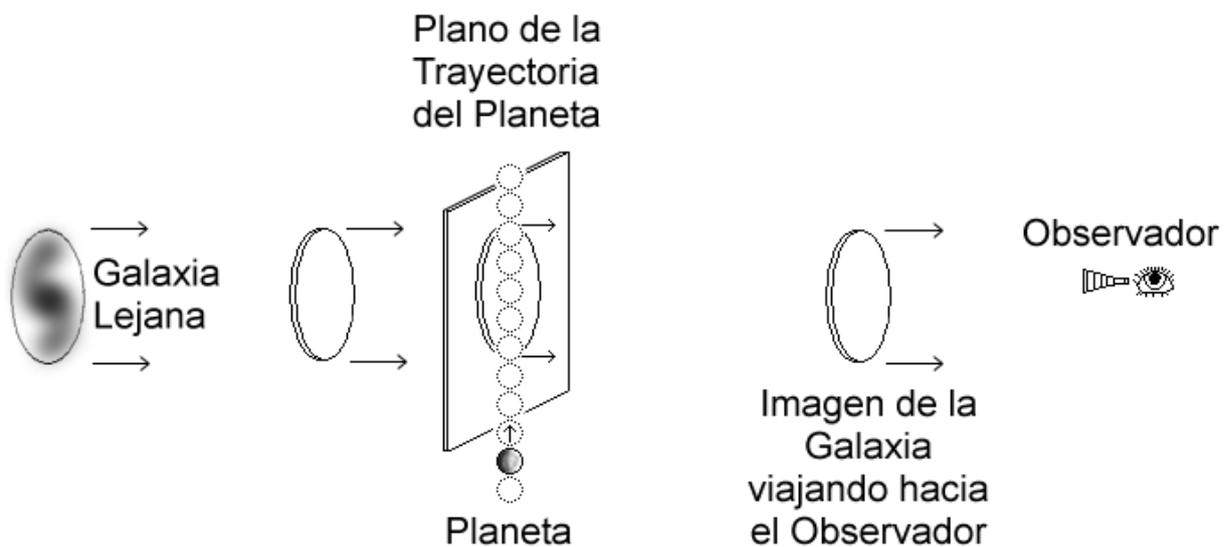


En el dibujo de las 02:15 horas, vemos como el último coche está pasando por la posición del observador, y a partir de ese momento ya solamente pasarán motos.

Pues bien, el análisis de este ejemplo nos lleva a un hecho curioso. Aunque del almacén han estado saliendo vehículos al ritmo de uno por segundo ininterrumpidamente, sin embargo en la posición del observador, se produjo una ausencia de vehículos que duró 15 minutos, durante los cuales no pasó ningún vehículo, ni motos ni coches. La diferencia de velocidades produjo esa ausencia de vehículos en la posición del observador, aunque el flujo de vehículos que salían del almacén fué constante.

## Ejemplo segundo

Supongamos que vamos a observar una galaxia y que un planeta de nuestro sistema solar nos la ocultará, es decir, la trayectoria del planeta pasará por delante de la galaxia. Supongamos que la velocidad con que nos llega la luz del planeta, es la que se considera como “la constante de la velocidad de la luz”, o sea 300.000 Km/s. Sin embargo supongamos que la luz que nos llega de la galaxia lo hace al doble de la velocidad que se considera como “la constante de la velocidad de la luz”, o sea  $2 \times 300.000 \text{ Km/s} = 600.000 \text{ Km/s}$ . Podemos imaginar la línea recta que une nuestro telescopio y la galaxia, y el plano perpendicular a dicha línea situado a la misma distancia que el planeta, de forma que la trayectoria del planeta estará situada sobre dicho plano. También podemos imaginar la forma de la galaxia dibujada sobre ese plano, como una proyección de la galaxia sobre el plano, teniendo el vértice en nuestro telescopio, pues realmente la luz de la galaxia está formada por fotones que viajan hacia nosotros, y de este modo podemos considerar que hay una sucesión de imágenes de la galaxia viajando desde el plano hasta nuestro telescopio, como una fila de “rodajas” con la forma de la galaxia moviéndose hacia nosotros. Ilustramos la situación en la siguiente figura.



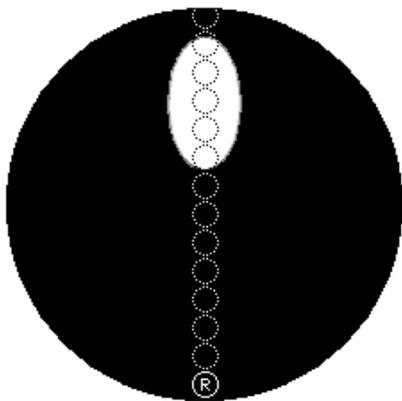
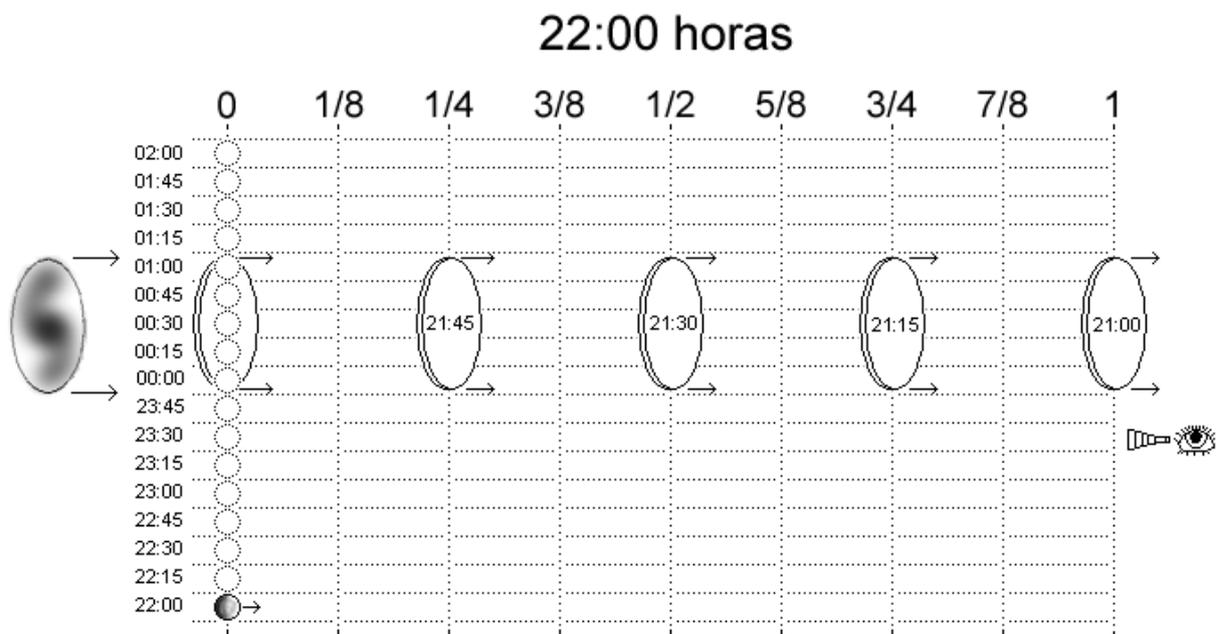
También suponemos que el planeta dista de nosotros 600.000 Km, y por ello su luz tardará dos horas en llegarnos, mientras que la luz de la galaxia tardará solo una hora en recorrer la misma distancia, es decir, los fotones que salen del planeta tardan dos horas en llegar a nuestro telescopio, mientras que los fotones emitidos por la galaxia, tardan una hora en recorrer la distancia que hay entre el planeta y nuestro telescopio.

Estamos en unas condiciones parecidas a las del ejemplo primero. El almacén de vehículos será ahora el plano donde discurre la trayectoria del planeta. De ese almacén, de ese plano, saldrán vehículos, que serán ahora los fotones que luego llegarán a nuestro telescopio, que hace las veces de observador. Las motos serán los fotones de la galaxia, los coches serán los fotones del planeta. Los fotones de la galaxia viajan al doble de velocidad que los fotones del planeta. De la misma manera que en el ejemplo primero no salían del almacén al mismo tiempo motos y coches, en este ejemplo segundo tampoco salen al mismo tiempo, fotones del planeta y fotones de la galaxia de una misma zona del plano. Es decir, si de una zona del plano salen fotones del planeta, no salen fotones de la galaxia, pues el planeta está ocultando esa zona e intercepta esos fotones de la galaxia. Cuando el planeta, por su movimiento, deja libre esa zona, entonces ya no salen de ella fotones del planeta sino de la galaxia.

Todo esto producirá, al igual que en el ejemplo primero, que haya un lapso de tiempo durante el cual, de una zona del plano, no nos lleguen fotones ni del planeta ni de la galaxia, es decir “se vea negro”; se verá un disco negro sobre la galaxia. Vamos a explicarlo a continuación.

Vamos a analizar este ejemplo también con la ayuda de esquemas para hacerlo más comprensible. Cada esquema representa la situación general en un momento determinado.

Empezamos con el esquema de las 22 : 00 horas, que nos servirá para explicar el significado de cada una de sus partes.



**Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta**



**Imagen real  
en Telescopio**

A la izquierda tenemos la galaxia lejana, a la derecha el observador (nosotros con nuestro telescopio).

En la parte superior está anotada la hora y minuto del instante que se representa. Justo debajo tenemos la serie de números

0    1/8    1/4    3/8    1/2    5/8    3/4    7/8    1

que representan la distancia recorrida por la luz, desde el plano donde está el planeta hasta nosotros. El planeta está en la posición 0 mientras que nosotros estamos en la posición 1. Es decir, es una escala donde tomamos como 1 la distancia entre el planeta y nosotros. En la parte izquierda, en la posición 0, está dibujada la trayectoria del planeta, que se mueve de abajo arriba, y se ha representado con un circulito la posición que ocupa el planeta cada 15 minutos, empezando por las 22 : 00 horas en la posición inferior, hasta las 02 : 00 horas en la superior. A la izquierda de cada círculo se ha anotado la hora en que el planeta estará en esa posición. El círculo sombreado representa la posición real del planeta en el momento definido por el esquema.

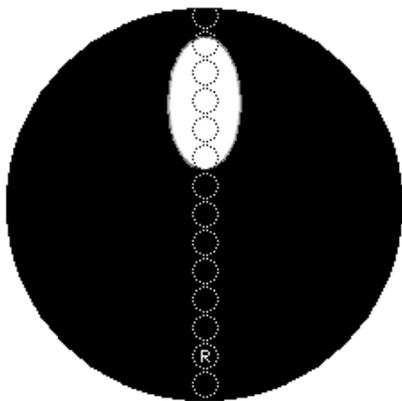
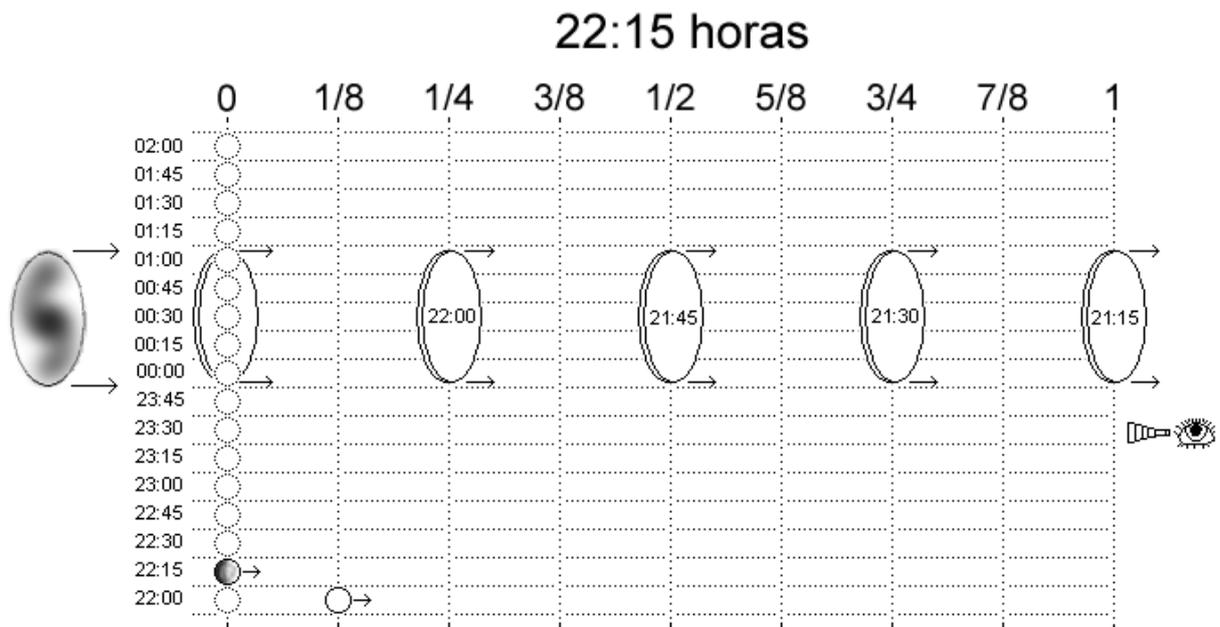
Las elipses centrales representan los fotones de la galaxia que se desplazan hacia nosotros. Cada elipse hay que verla como una imagen plana de la galaxia formada por los fotones procedentes de la galaxia que atravesaron el plano de la trayectoria del planeta en un instante determinado. Ese instante está anotado en el centro de cada elipse. En el esquema de las 22 : 00 horas, la elipse en la posición 1, tiene anotado las 21 : 00, porque son esos los fotones que atravesaron el plano de la trayectoria del planeta a las 21 : 00 horas, hace 1 hora, que es lo que tarda la luz de la galaxia en recorrer la distancia

entre el planeta y nosotros. Los fotones que atravesaron el plano a las 21 : 30 horas, ahora a las 22 : 00 horas, van a mitad de camino y por eso los representamos en la posición 1/2. Los fotones que están atravesando el plano a las 22 : 00, son los representados por la elipse de la posición 0.

En la parte inferior del esquema hay dos círculos negros. El círculo negro de la parte inferior izquierda es un esquema de la zona que abarca el ocular de nuestro telescopio, donde se han marcado con pequeñas circunferencias las posiciones de la trayectoria de planeta, y se ha marcado con la letra "R" la posición real que ocupa el planeta en ese momento, aunque por supuesto, su luz que acaba de salir de esa posición en ese momento, no nos llegará hasta dentro de 2 horas.

El de la derecha representa la imagen real que observaremos por el ocular de nuestro telescopio en ese momento. A las 22 : 00 horas veremos solamente la galaxia, pues los fotones que en ese momento salen del planeta, tardarán dos horas en llegar hasta nosotros. Los fotones que forman la imagen que estamos viendo de la galaxia, son los fotones que atravesaron el plano de la posición 0 (el plano de la trayectoria del planeta) a las 21 : 00.

En los siguientes esquemas veremos como los fotones del planeta que salieron a las 22 : 00 horas van avanzando hacia nosotros, mientras el planeta cambia de posición y emite nuevos fotones desde cada posición. Aunque todo esto sucede de manera continua, nosotros nos fijaremos en lo que va sucediendo en instantes separados 15 minutos.



**Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta**



**Imagen real  
en Telescopio**

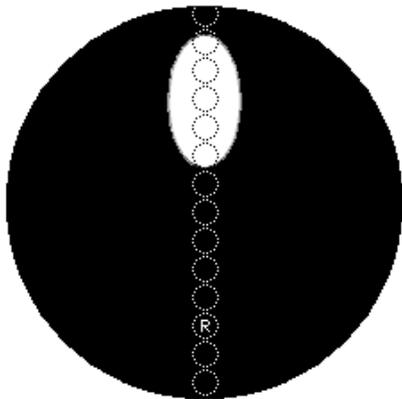
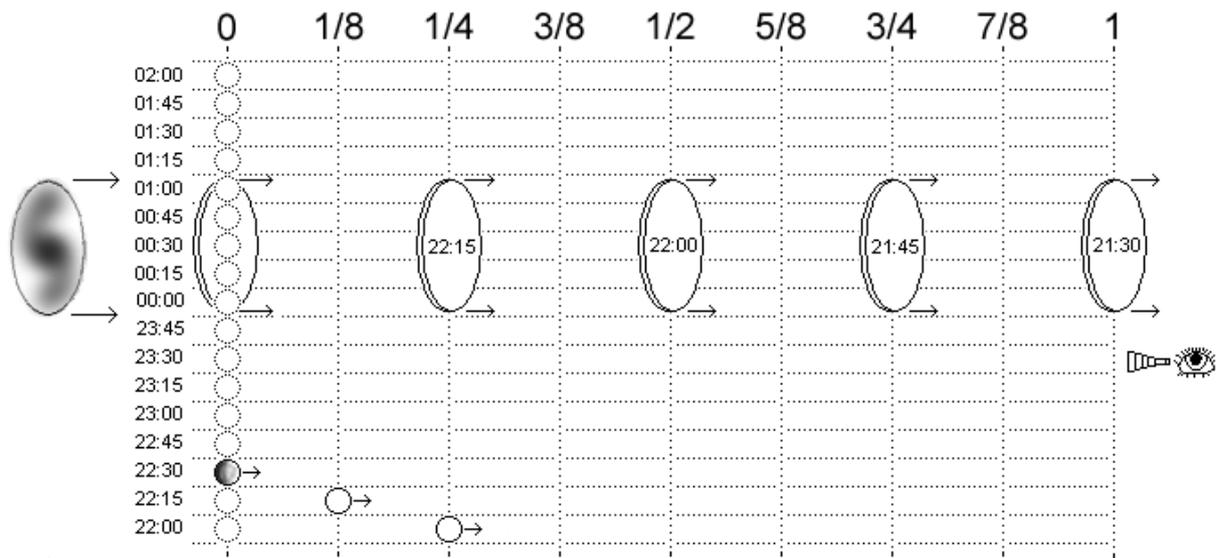
Esquema 22 : 15 horas.

Los fotones que salieron del planeta hace 15 minutos, a las 22 : 00 horas, han recorrido  $1/8$  de la distancia hasta nosotros y los representamos como una circunferencia en la posición  $1/8$  y en la fila horaria de las 22 : 00 horas, fila por donde irán avanzando hasta llegar a la posición 1, lo cual significará que han llegado a nuestro telescopio.

El planeta por su parte ha avanzado hasta la posición 22 : 15 , como es lógico.

Los fotones de la galaxia que atravesaron el plano de la posición 0 a las 22 : 00 han recorrido  $1/4$  de la distancia hasta nosotros. Vemos la diferencia con los fotones del planeta que salieron en el mismo momento y que solo han recorrido  $1/8$  de la distancia.

22:30 horas

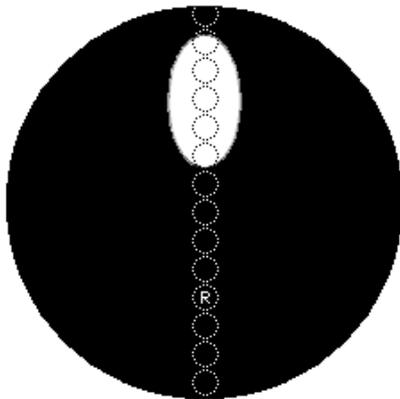
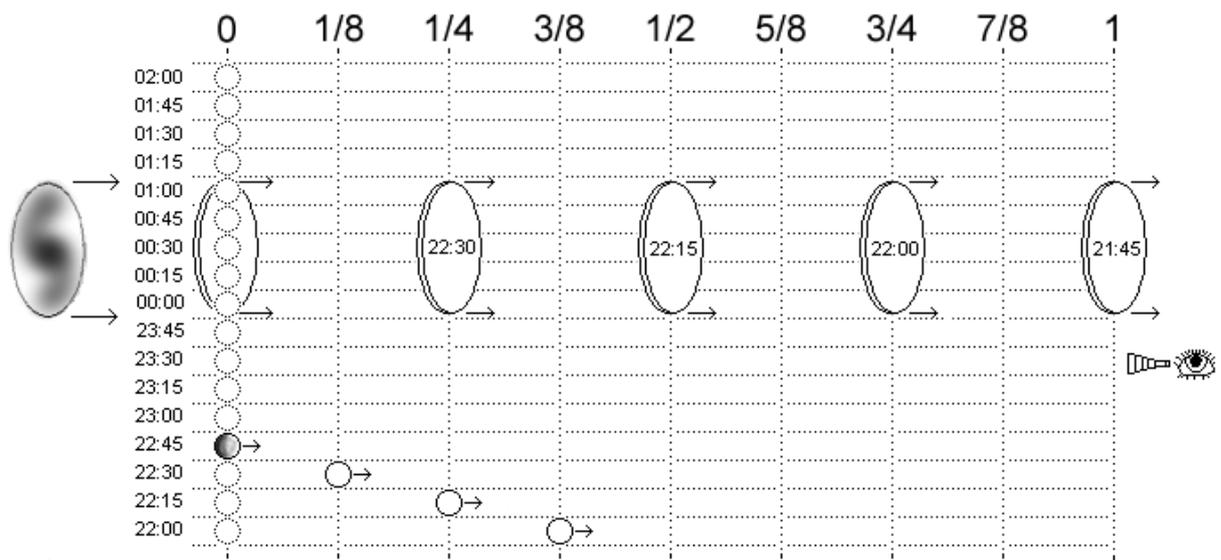


Esquema de la observación con trayectoria de planeta



Imagen real en Telescopio

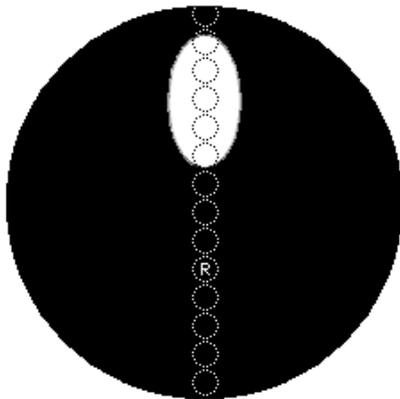
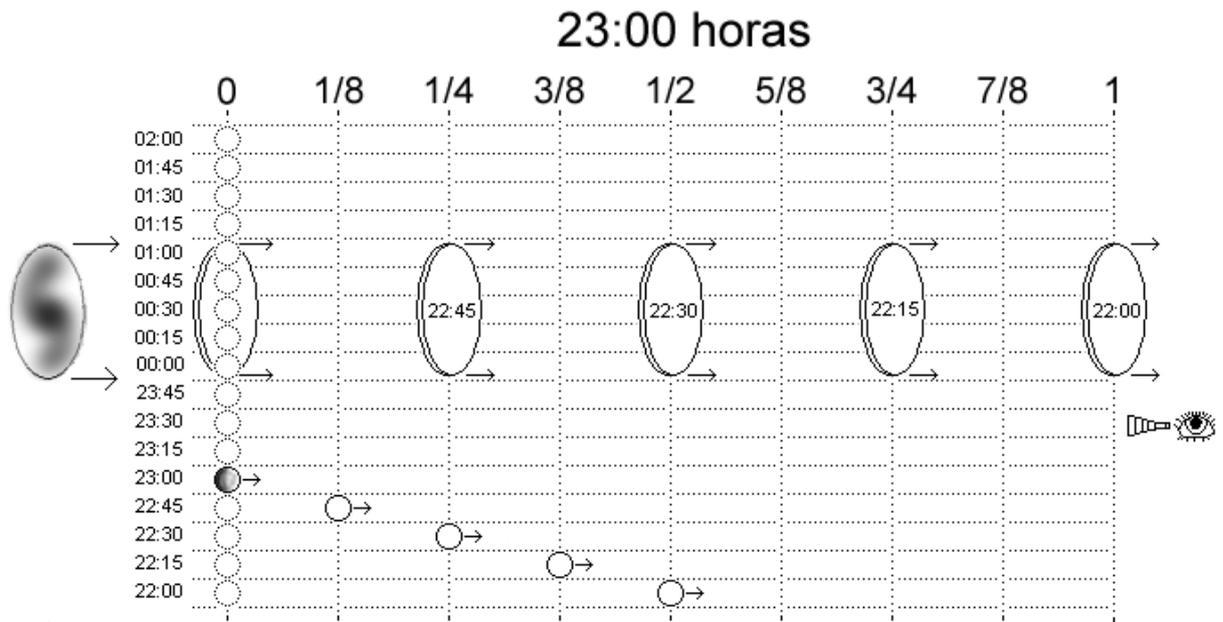
22:45 horas



Esquema de la observación con trayectoria de planeta



Imagen real en Telescopio



Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta

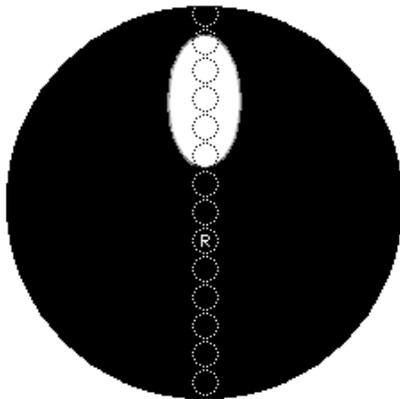
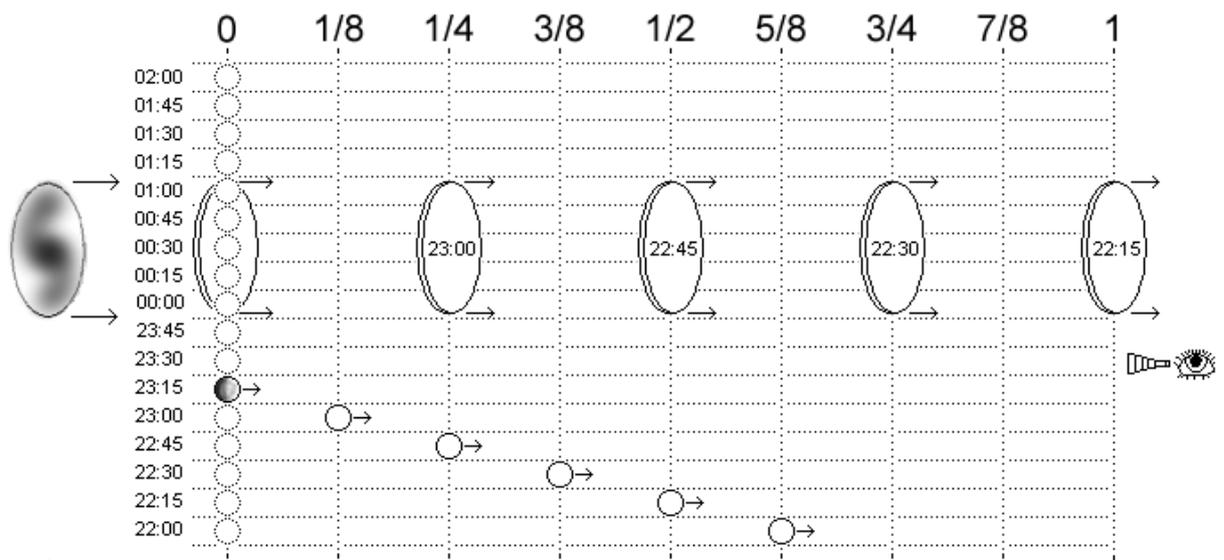


Imagen real  
en Telescopio

Esquema 23 : 00 horas.

Los fotones del planeta que salieron a las 22 : 00 han recorrido la mitad del camino, mientras que los fotones de la galaxia que salieron a la misma hora, nos están llegando en este momento, y son los que forman la imagen que vemos en el telescopio.

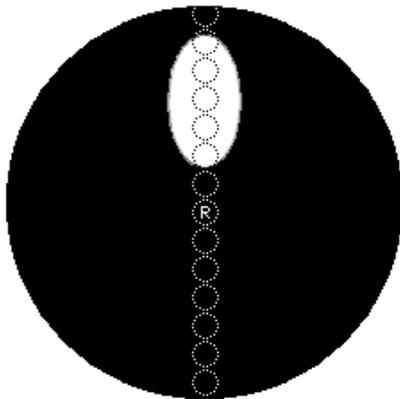
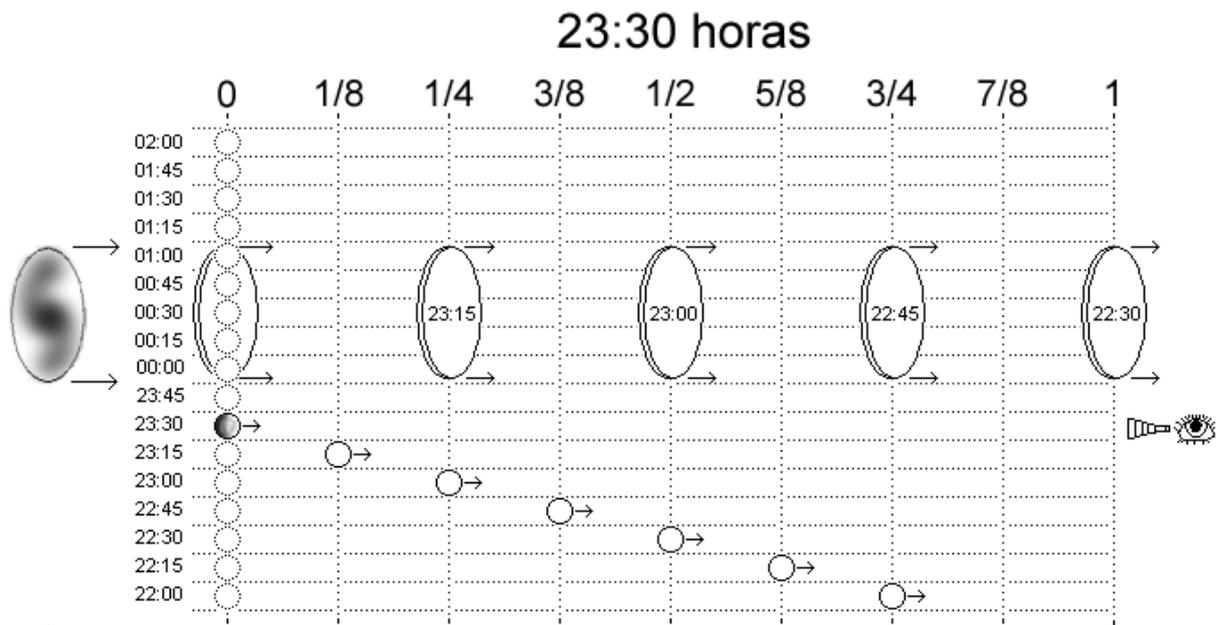
23:15 horas



Esquema de la observación con trayectoria de planeta



Imagen real en Telescopio

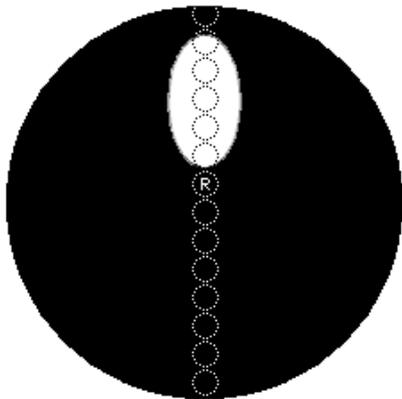
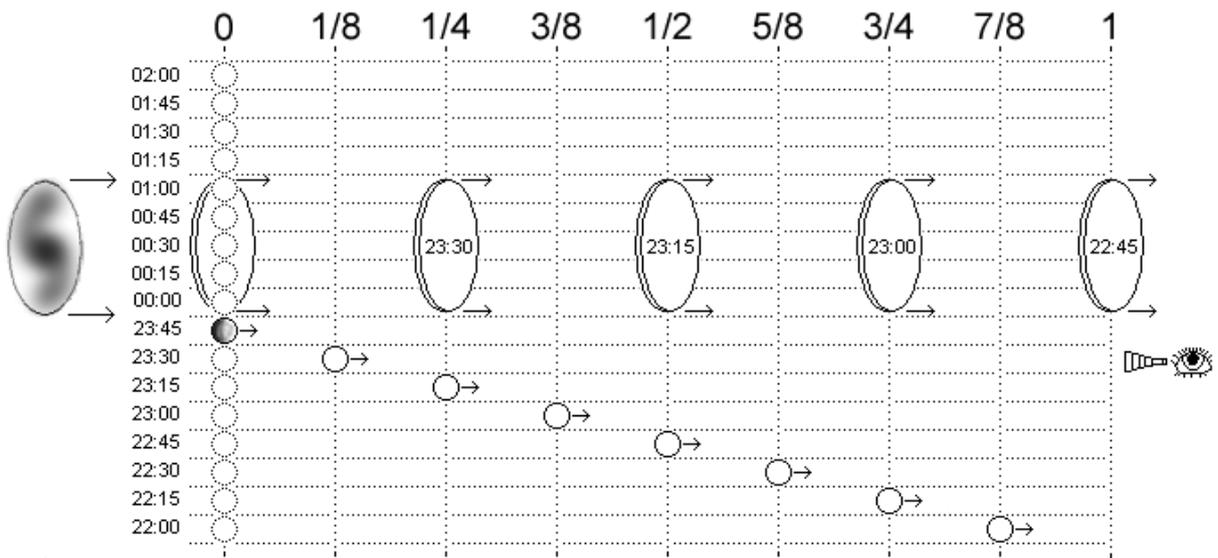


Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta



Imagen real  
en Telescopio

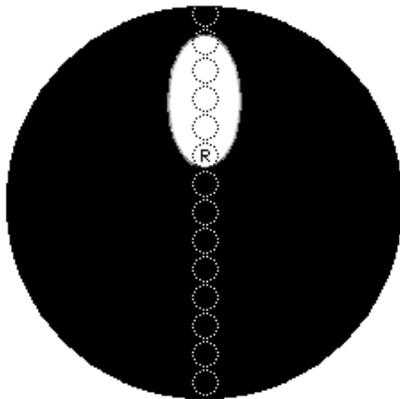
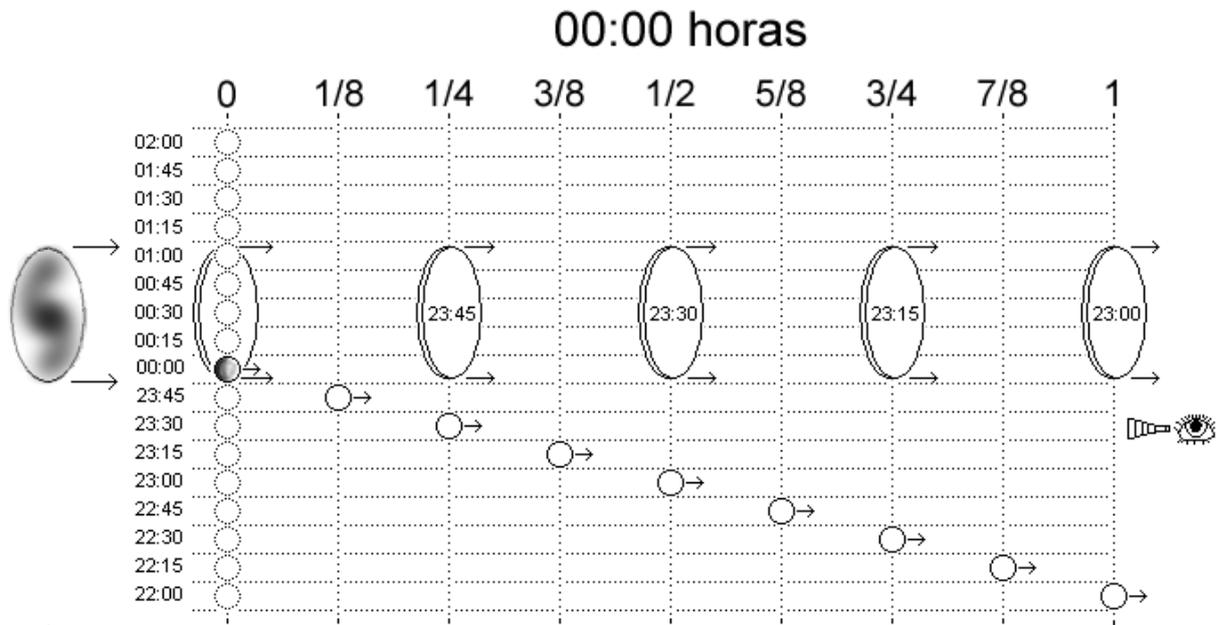
23:45 horas



Esquema de la observación con trayectoria de planeta



Imagen real en Telescopio



Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta

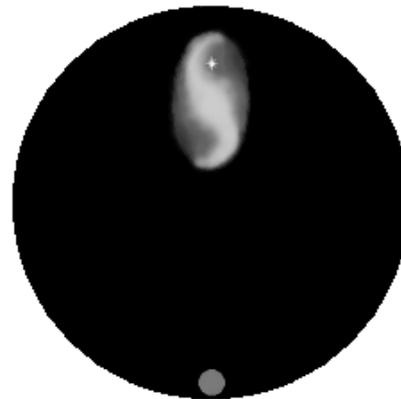


Imagen real  
en Telescopio

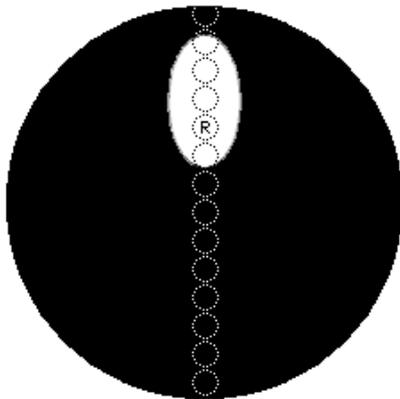
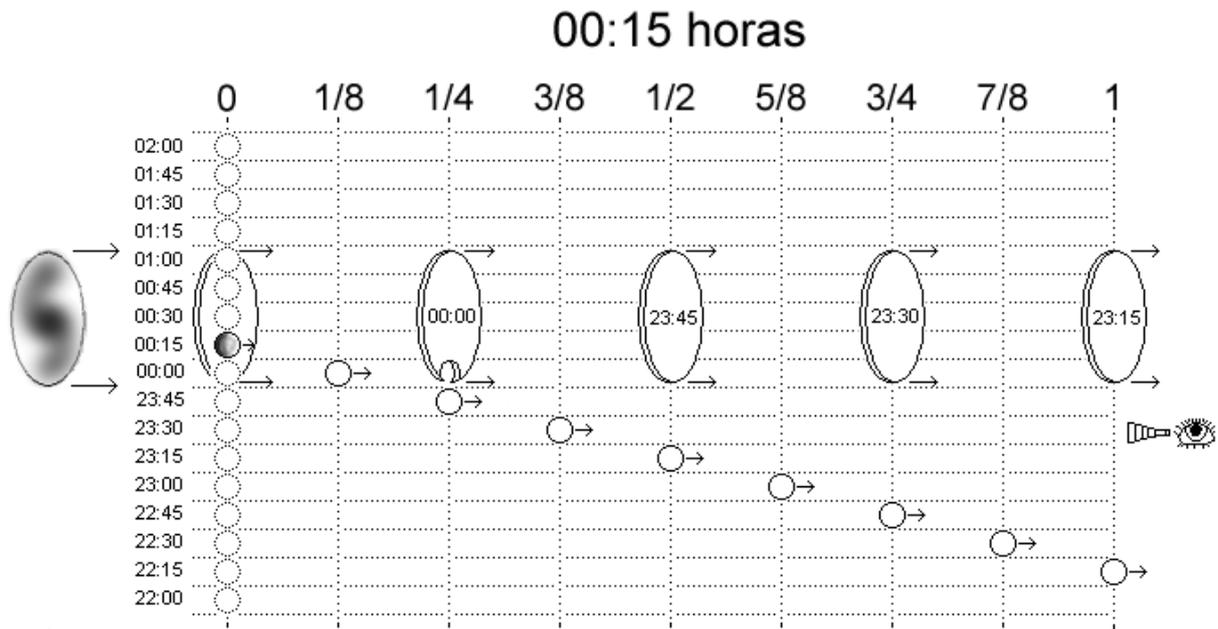
Esquema 00 : 00 horas.

Por fin han llegado a nuestro telescopio los fotones del planeta que salieron a las 22 : 00 y por ello podemos ver la imagen del planeta apareciendo por la parte inferior de nuestro campo de visión.

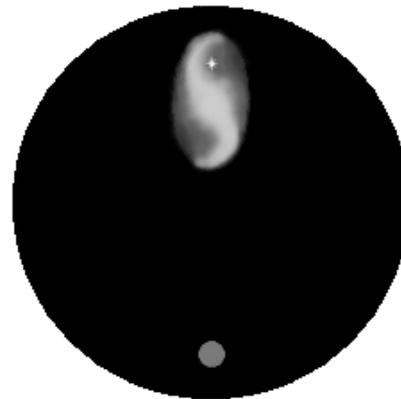
Por otra parte, y es solo una casualidad en este ejemplo, el planeta ha llegado a la posición donde tapa la galaxia. Algunos fotones de la galaxia que atravesarían la posición 0 se ven interceptados por el planeta, que les impide continuar su viaje hacia nosotros. Serán justo un grupo de fotones con la forma del planeta, y el “dibujo” de la galaxia que viaja hacia nosotros tendrá la forma de la galaxia con un “comido” en su parte inferior, con la forma y tamaño del disco del planeta, algo así



El lugar de los fotones de la galaxia interceptados, es sustituido por los fotones del planeta, pero estos viajan más despacio.



**Esquema de la observación con trayectoria de planeta**



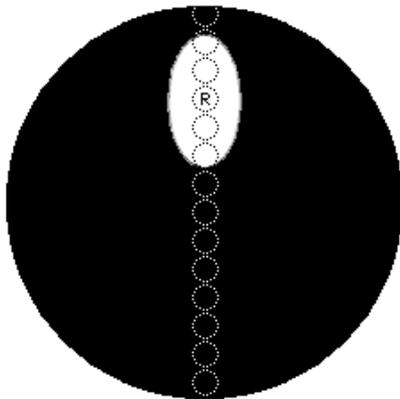
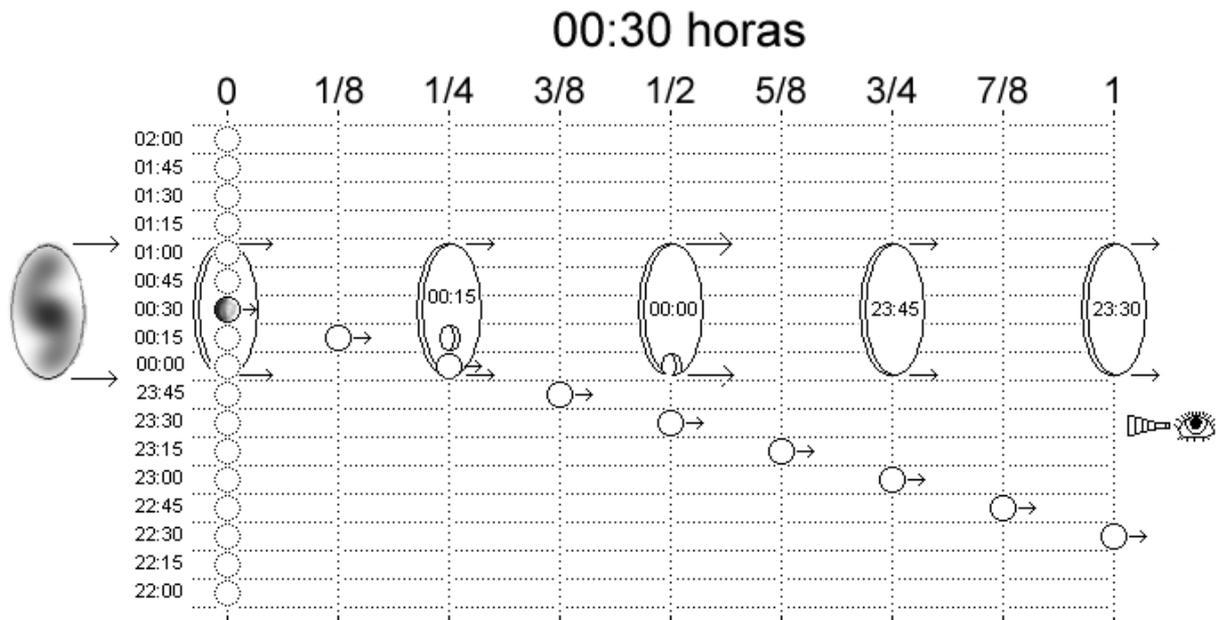
**Imagen real en Telescopio**

Esquema 00 : 15 horas.

La imagen de la galaxia con el “comido” en su parte inferior, la imagen de las 00 : 00, ha recorrido  $1/4$  del camino, mientras que los fotones del planeta que salieron cuando se produjo ese comido, han recorrido solo  $1/8$  del camino, de forma que ambos grupos de fotones están separados por una distancia que irá creciendo.

El planeta ha avanzado ocultando otra parte de la galaxia, produciendo otra imagen de la galaxia con un agujero en su tercio inferior, rellenado en el primer instante con fotones del planeta, pero por la diferencia de velocidades, la imagen de la galaxia con el agujero quedará separada de los fotones del planeta, que se irán retrasando.

Por otra parte, por el ocular de nuestro telescopio veremos la imagen del planeta que se ha acercado a la galaxia, logicamente. Los fotones que vemos son los que salieron del planeta a las 22 : 15, y los vemos en la posición que ocupaba el planeta a esa hora.



Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta

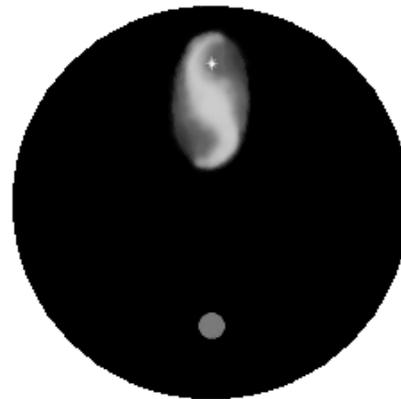


Imagen real  
en Telescopio

Esquema 00 : 30 horas.

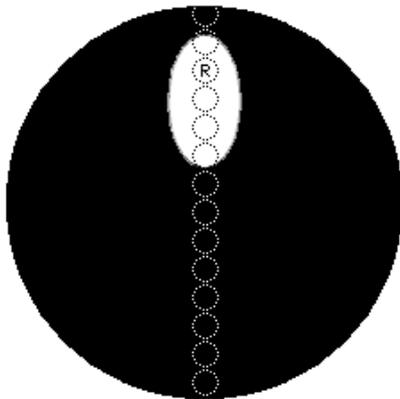
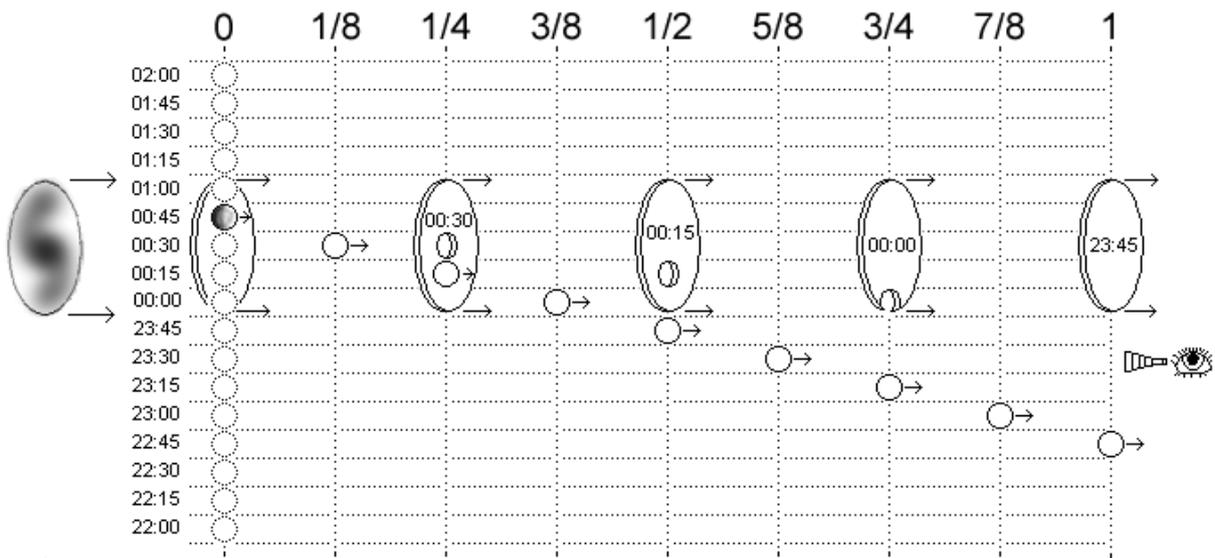
Los fotones de la galaxia, que atravesaron la posición 0 a las 00 : 00, y que forman la imagen de la galaxia con el comido en su parte inferior, han recorrido la mitad del camino.

La imagen de la galaxia que atravesó la posición 0 a las 00 : 15, y que tiene un comido en su tercio inferior, ha recorrido 1/4 del camino.

Otra nueva imagen de la galaxia atraviesa la posición 0 en este instante. Ahora el planeta está en el centro de la imagen de la galaxia, interceptando esos fotones de la galaxia, sustituyéndolos por los suyos y produciendo un comido con su forma en el centro de la imagen de la galaxia.

Con nuestro telescopio vemos la imagen de la galaxia que atravesó la posición 0 a las 23 : 30, y la imagen del planeta en su posición de las 22 : 30 , cada vez mas cerca de la galaxia.

00:45 horas



Esquema de la observación con trayectoria de planeta

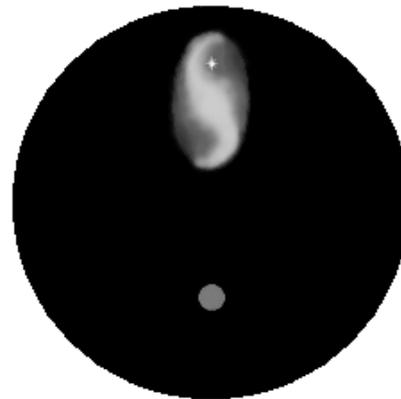
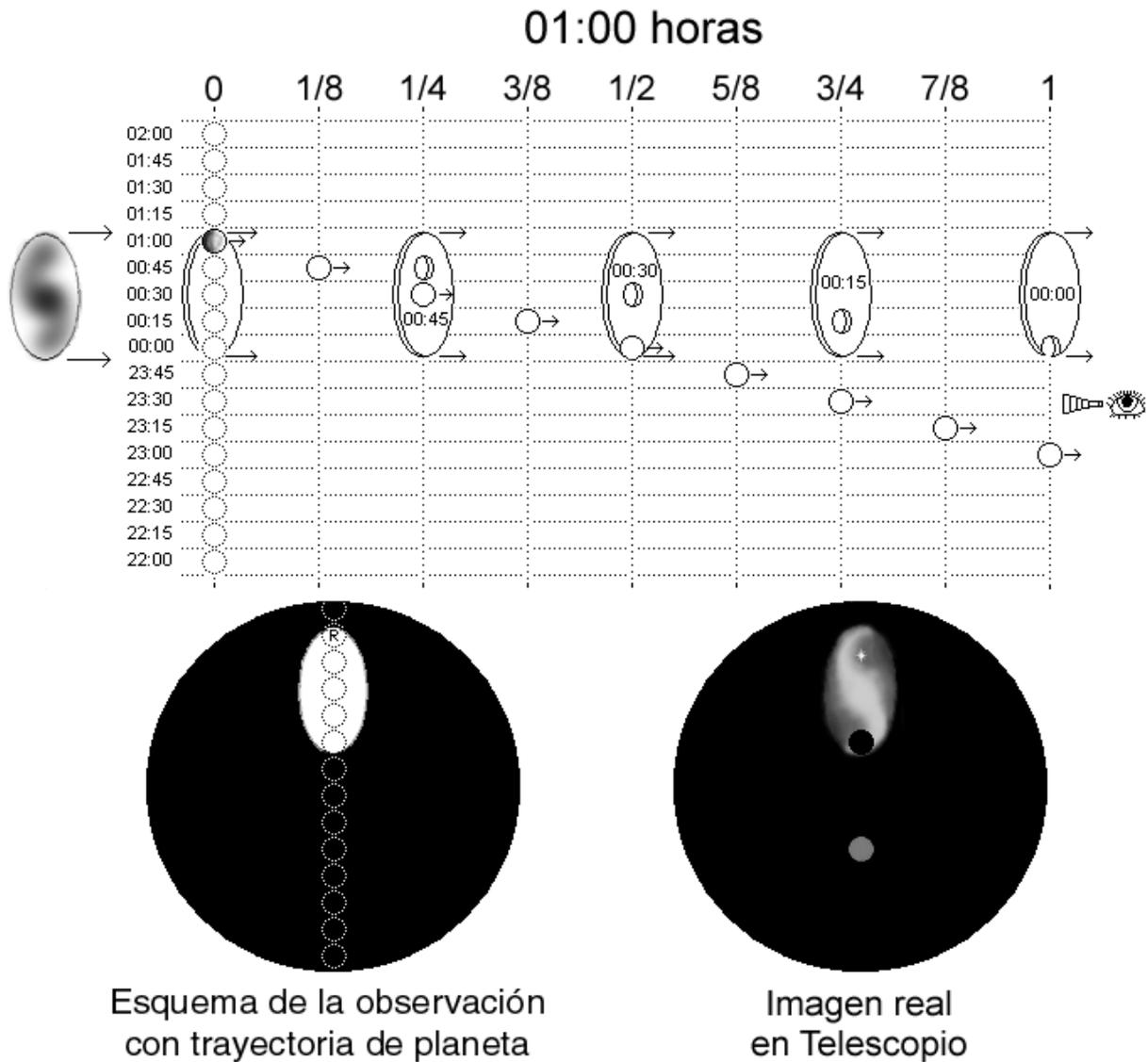


Imagen real en Telescopio

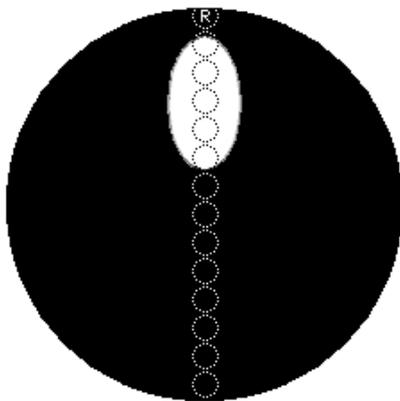
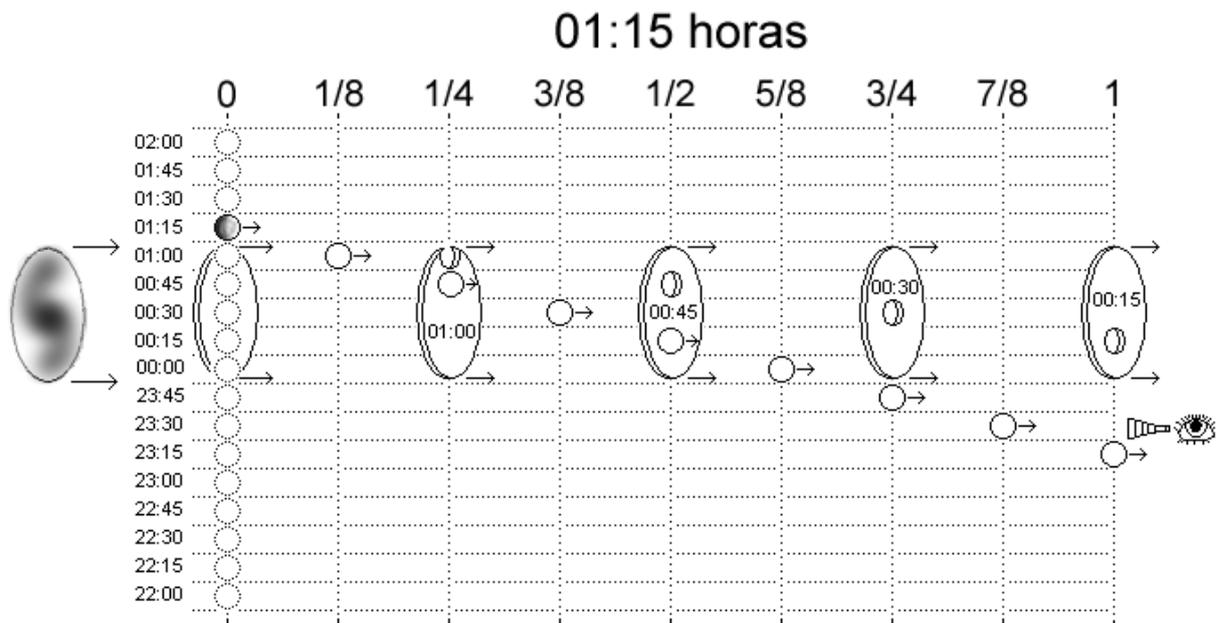


Esquema 01 : 00 horas.

La imagen de la galaxia que atravesó la posición 0 a las 00 : 00, y que tiene un comido en su extremo inferior, llega ahora a nuestro telescopio. Los fotones que emitió el planeta cuando estaba en esa posición, se encuentran a mitad de camino. Por el ocular de nuestro telescopio vemos que a la galaxia le “faltan” los fotones que interceptó el planeta a las 00 : 00, y por ello vemos la imagen de la galaxia con el “comido” en su extremo inferior, como un disco negro con la forma y tamaño del planeta.

Los fotones que nos están llegando del planeta son los que emitió a las 23 : 00, cada vez mas cerca de la galaxia.

La diferencia de velocidades de la luz ha hecho que veamos una separación entre el disco negro sobre la galaxia y la imagen del planeta. Esta separación se mantendrá durante toda la observación. El efecto será como si el disco negro precediese a la imagen del planeta, siempre a la misma distancia angular, los dos moviéndose a la misma velocidad, el disco negro y la imagen del planeta.



Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta

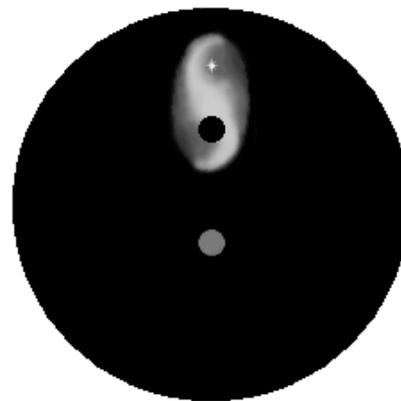
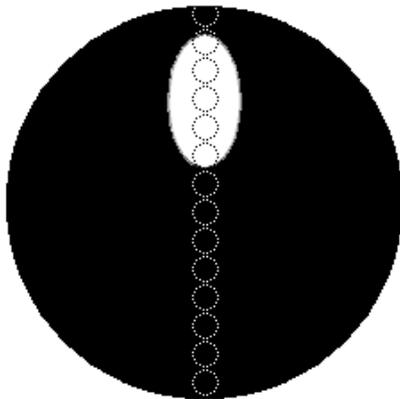
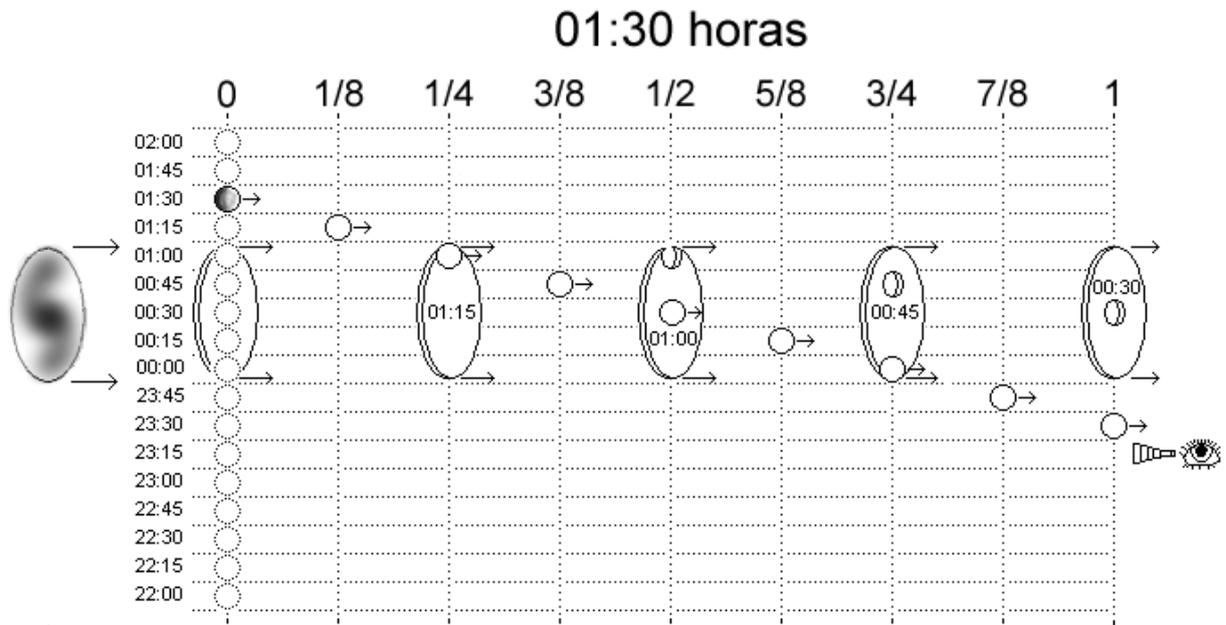


Imagen real  
en Telescopio

Esquema 01 : 15 horas.

La imagen de la galaxia que llega en este momento a nuestro telescopio es la formada por los fotones que pasaron por la posición 0 a las 00 : 15, cuando el planeta tapaba el tercio inferior de la galaxia, e interceptó esos fotones dejando un “comido” con su forma y tamaño en el conjunto de fotones que forman la imagen de la galaxia. El planeta lanzó sus propios fotones rellenando ese hueco con ellos, pero esos fotones del planeta por su menor velocidad van ahora a mitad de camino, y a la imagen que recibimos de la galaxia le faltan los fotones que interceptó el planeta y así la vemos con un disco negro en su tercio inferior.

La imagen que vemos del planeta se ha acercado mas a la galaxia, la distancia entre la imagen del planeta y la del disco negro sobre la galaxia, es la misma que la que vimos a las 01 : 00 horas.



Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta

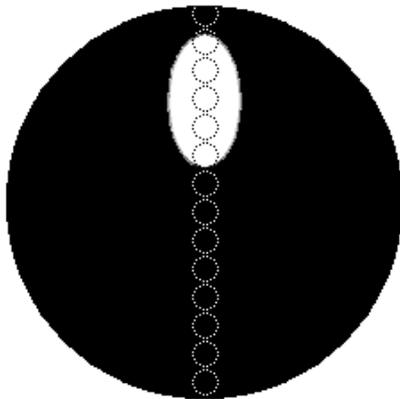
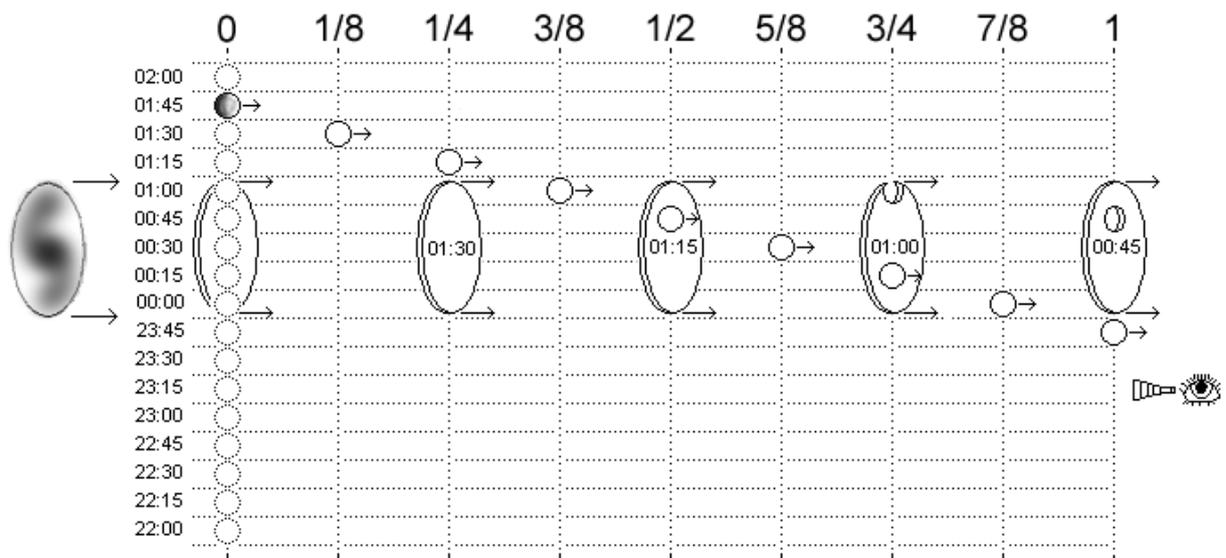


Imagen real  
en Telescopio

Esquema 01 : 30 horas.

El fenómeno sigue su curso. El disco negro sobre la galaxia avanza recorriéndola de abajo arriba, mientras la imagen del planeta la sigue, siempre a la misma distancia.

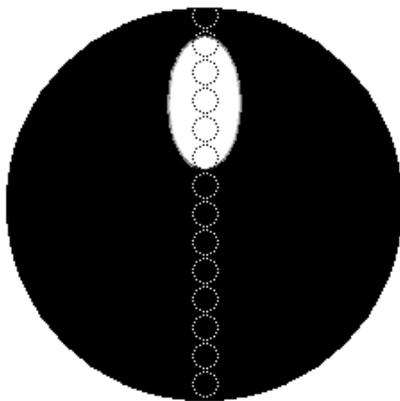
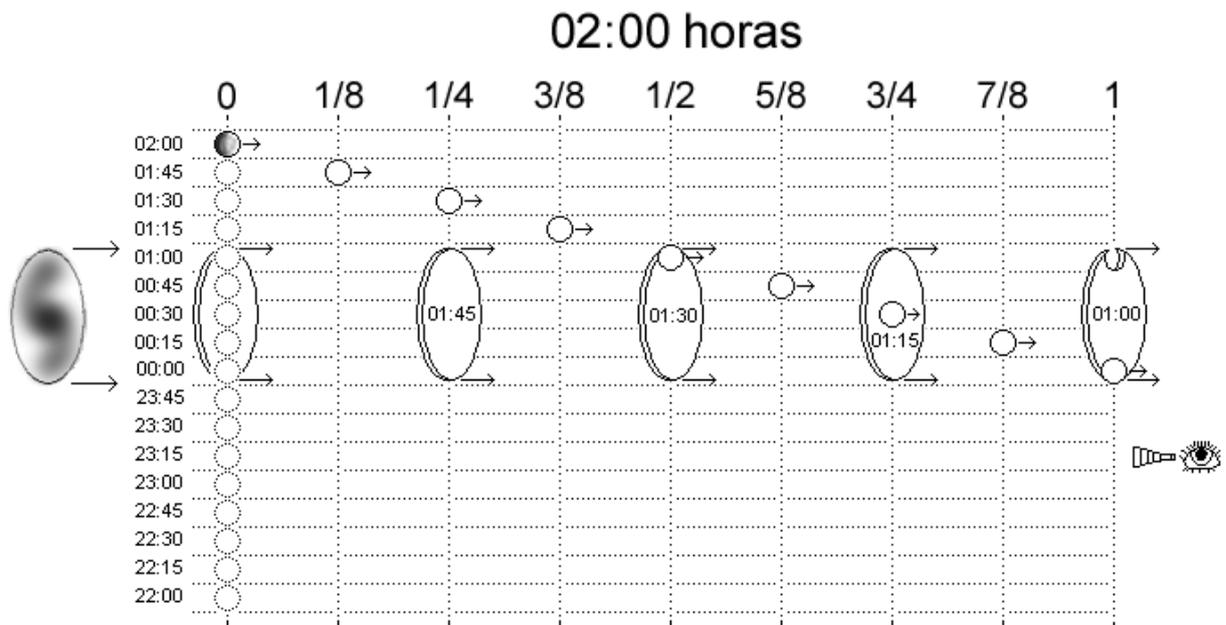
01:45 horas



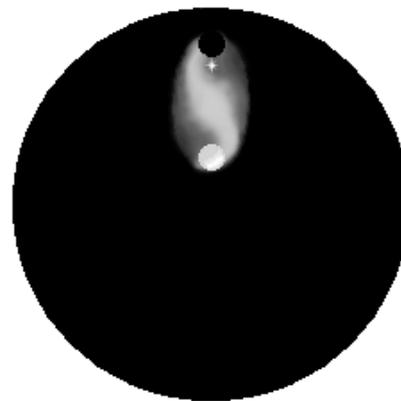
Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta



Imagen real  
en Telescopio



**Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta**

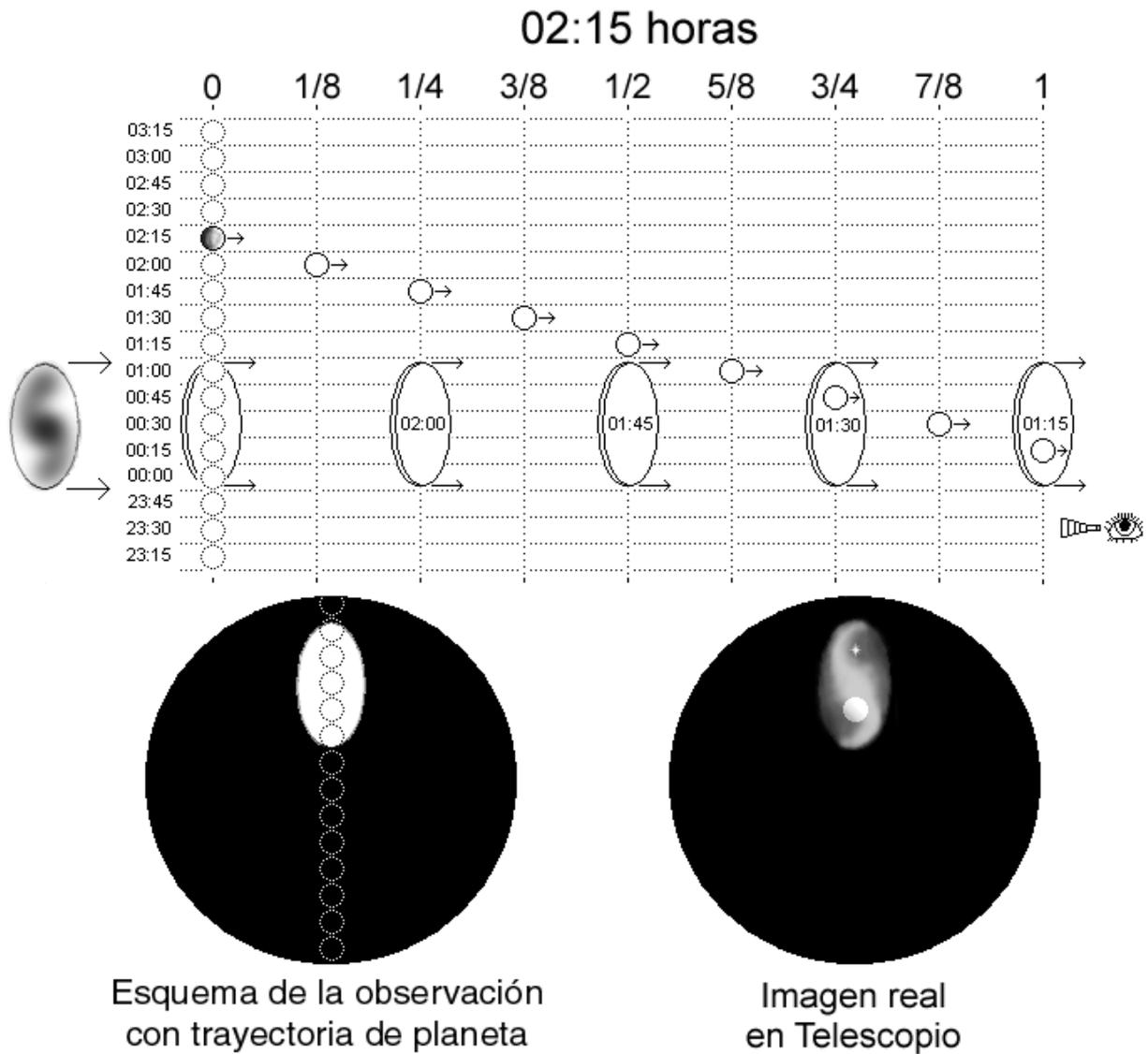


**Imagen real  
en Telescopio**

Esquema 02 : 00 horas.

Los fotones que recibimos del planeta son los que salieron a las 00 : 00, y la imagen de la galaxia que recibimos es la que atravesó la posición 0 a las 01 : 00, donde el comido de los fotones que le “faltan” a la galaxia está en el extremo superior.

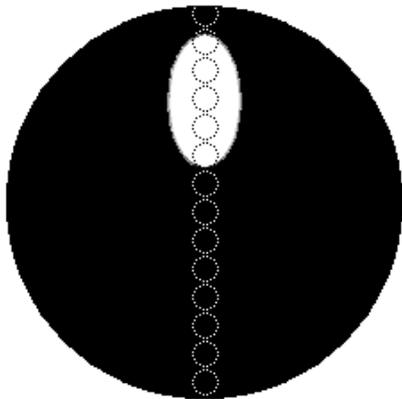
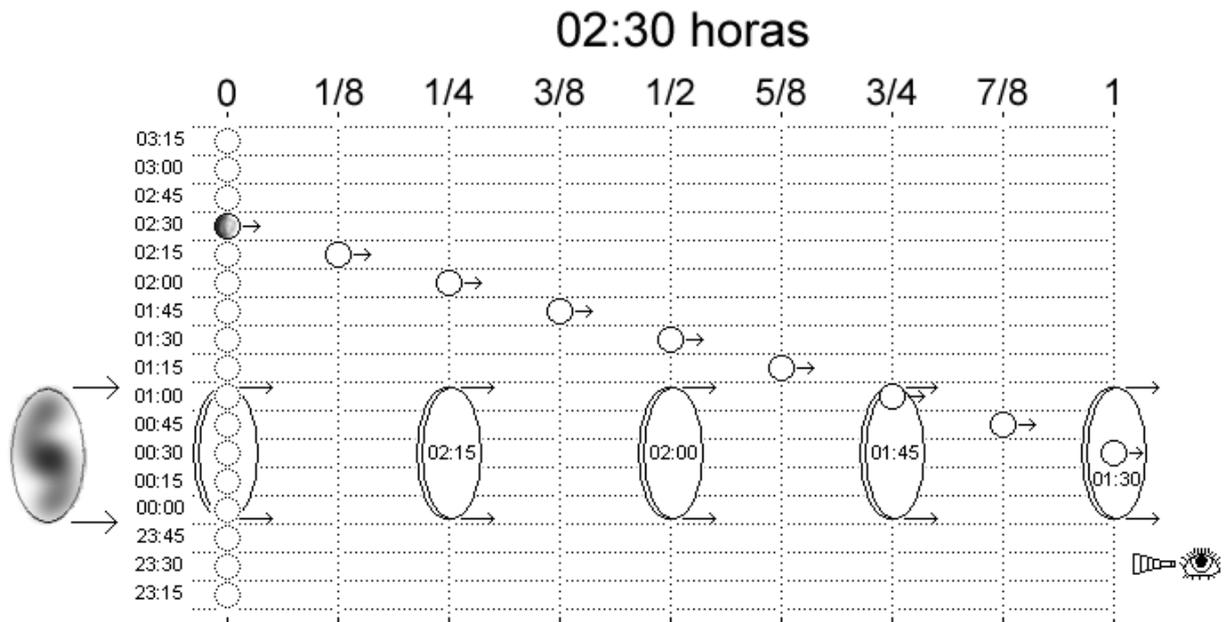
En el extremo inferior de la imagen de la galaxia vemos también los fotones del planeta. De esta forma, recibimos en el mismo lugar los fotones del planeta y también los fotones de la parte inferior de la galaxia, emitidos en momentos diferentes y que ahora coinciden en la llegada a nuestro telescopio. Tendremos pues una superposición de imágenes. Hemos representado esto, sumando el brillo de la imagen del planeta al brillo de esa parte de la galaxia, como si la imagen del planeta fuese semitransparente, y dejase ver la forma de la galaxia. Aunque en realidad es la suma de los fotones de la galaxia y del planeta.



Esquema 02 : 15 horas.

Lo que nos llega ahora al telescopio son dos imágenes superpuestas, la formada por los fotones de la galaxia que pasaron por la posición 0 a las 01 : 15, y la formada por los fotones del planeta que partieron del planeta a las 00 : 15.

La imagen de la galaxia es completa, no le faltan fotones interceptados por el planeta, ya que los fotones de la galaxia pasaron por la posición 0 a las 01 : 15, cuando la posición real del planeta ya había sobrepasado la zona de la galaxia, de forma que el planeta no pudo interceptar los fotones de la galaxia.



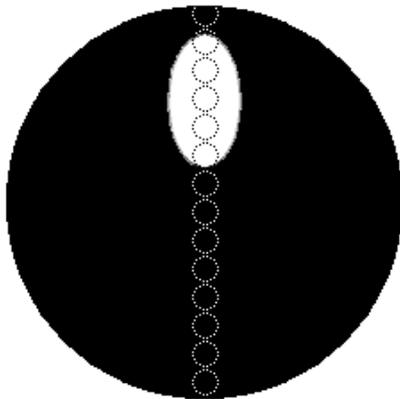
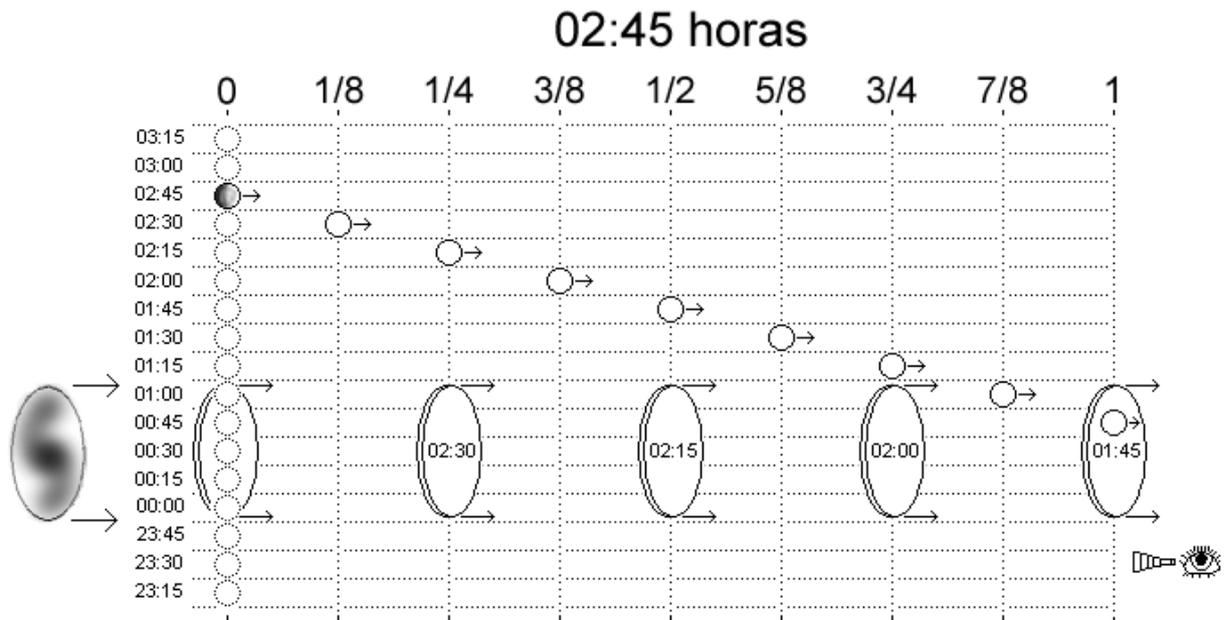
Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta



Imagen real  
en Telescopio

Esquema 02 : 30 horas.

Las imágenes superpuestas siguen llegando. Ahora la imagen del planeta está en el centro de la galaxia.



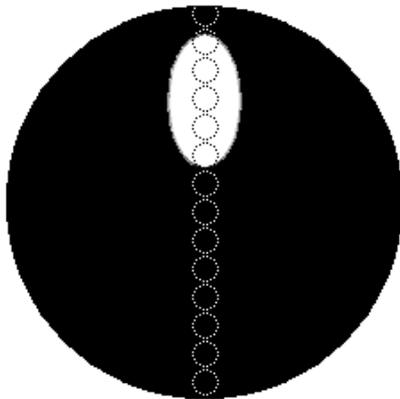
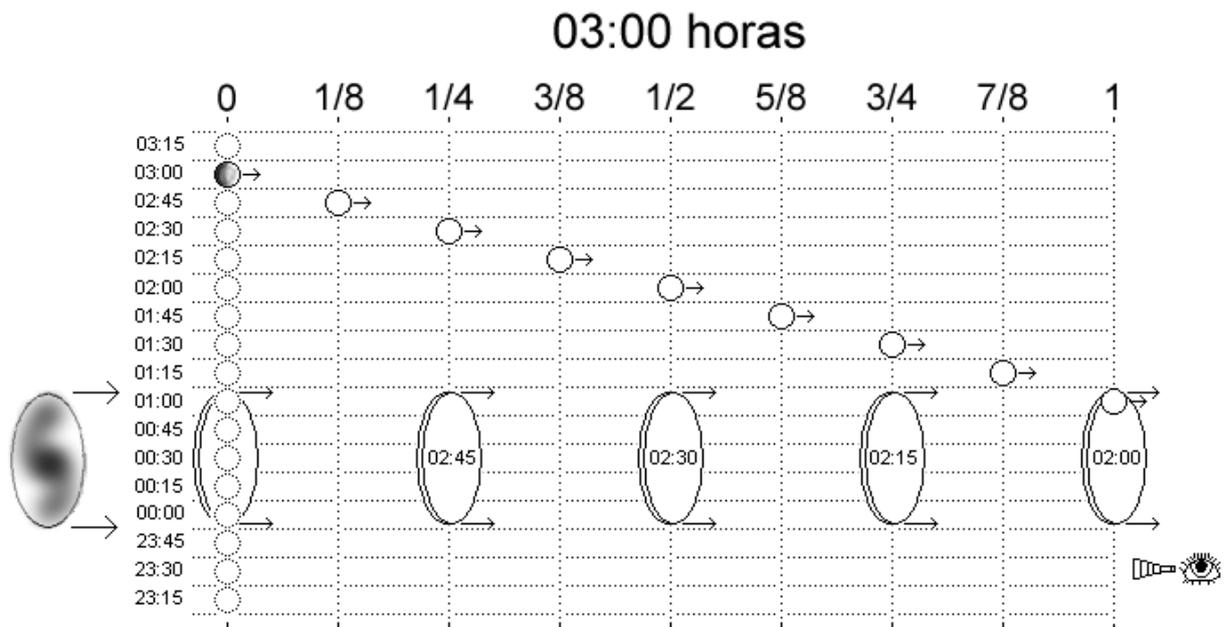
**Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta**



**Imagen real  
en Telescopio**

Esquema 02 : 45 horas.

Si en la galaxia hay una supernova, que hemos representado como la estrella brillante en el tercio superior de la galaxia, cuando la imagen del planeta pase por delante, se verán ambas imágenes superpuestas, de forma que parecerá que el planeta es “transparente” pues la supernova se verá a través de él.



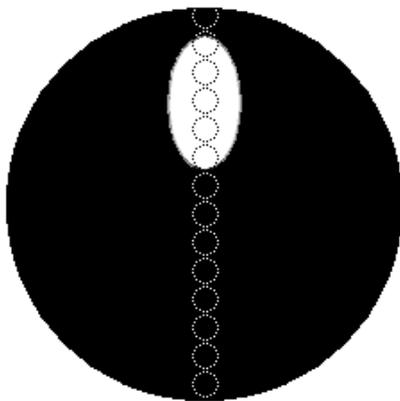
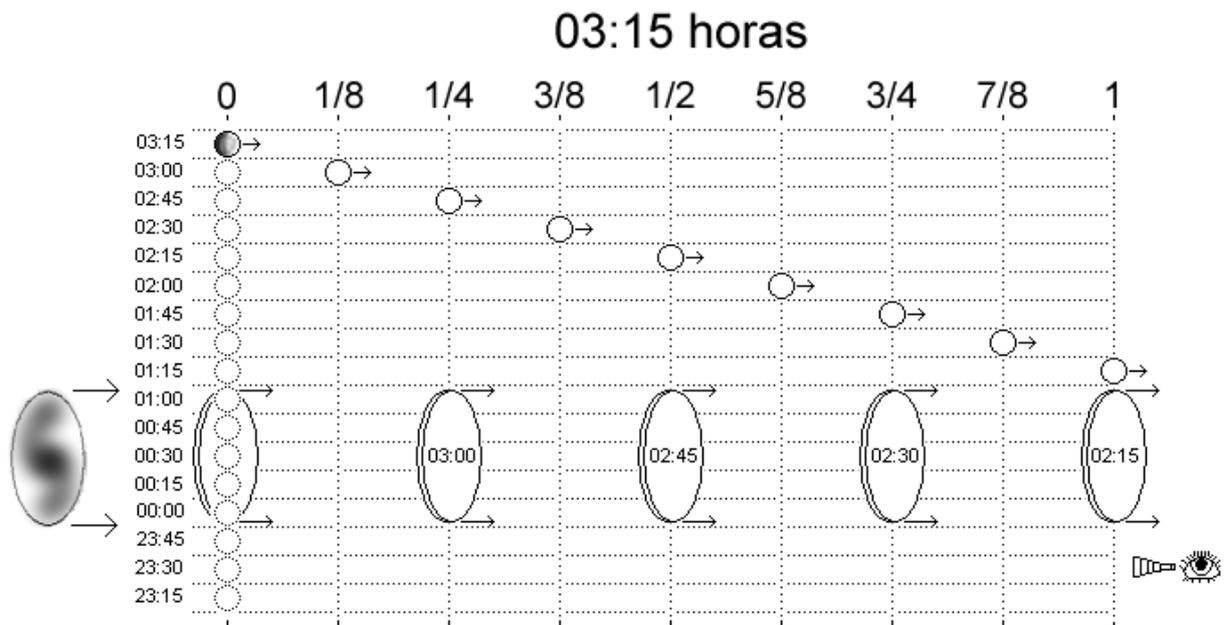
Esquema de la observación  
con trayectoria de planeta



Imagen real  
en Telescopio

Esquema 03 : 00 horas.

La imagen del planeta se superpone con la de la galaxia en su extremo superior.



Esquema de la observación con trayectoria de planeta

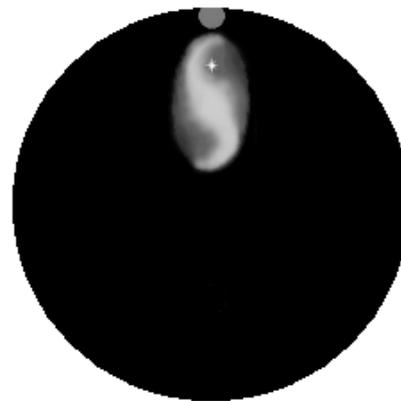


Imagen real en Telescopio

Esquema 03 : 15 horas.

La imagen del planeta ya no está sobre la galaxia, no se superponen las imágenes, aunque siguen siendo imágenes formadas por fotones que pasaron por la posición 0 en distintos momentos: La de la galaxia pasó por la posición 0 a las 02 : 15, mientras que la del planeta partió de la posición 0 una hora antes, a las 01 : 15.

### Conclusión del ejemplo 2

Hemos visto que, en el supuesto de que la velocidad de la luz que nos llega de la galaxia sea mayor que la velocidad de la luz que nos llega del planeta, veremos un disco negro desplazándose sobre la galaxia, que irá precediendo la imagen del planeta. Además, aunque sea mucho mas difícil de observar, cuando la imagen del planeta llegue a la imagen de la galaxia, veremos las dos imágenes superpuestas durante todo el recorrido del planeta sobre la galaxia.

## Ecuaciones del caso general

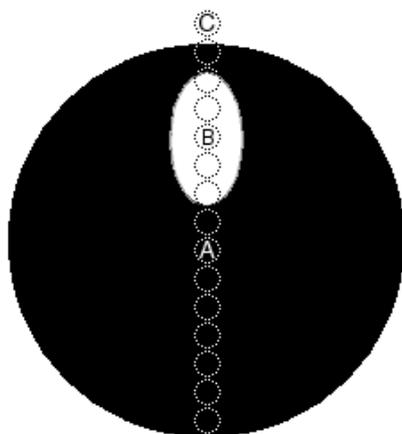
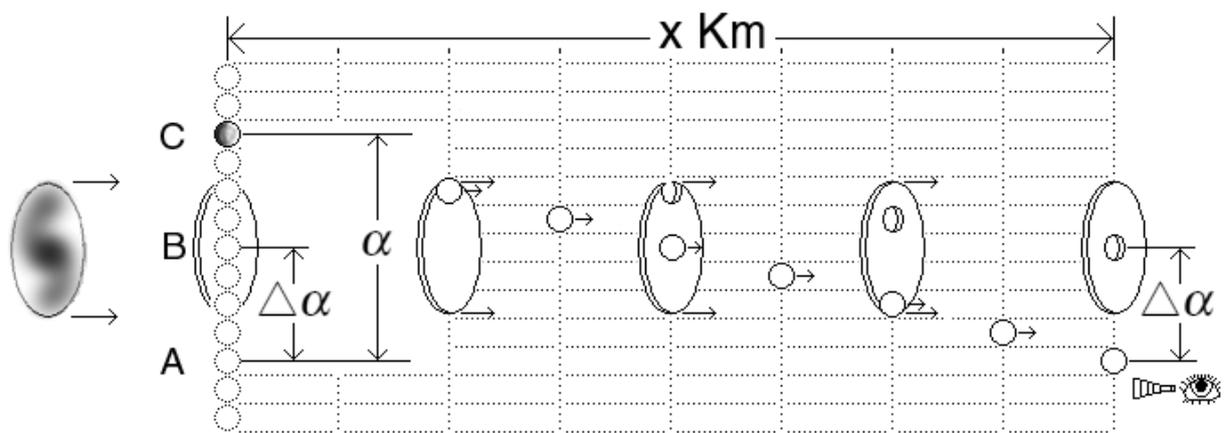
Vamos a deducir las ecuaciones que regirán el experimento en el caso general. El objetivo es poder hacer una foto de la ocultación, de forma que se vea la galaxia con el disco negro precediendo la imagen del planeta, y separados por un ángulo que llamaremos  $\Delta\alpha$  y expresaremos en segundos de arco ( $''$ ). Estas ecuaciones vendrán expresadas en función de las siguientes 3 cantidades:

- Distancia entre el planeta y nosotros, que denotaremos por  $x$ , y expresaremos en kilómetros,  $Km$ .
- Velocidad angular del planeta respecto a nosotros, que denotaremos por  $\omega$  y que expresaremos en segundos de arco ( $''$ ) por segundos de tiempo (s).
- Velocidad de la luz procedente de la galaxia.

Además tendremos que tener en cuenta, para tener éxito en la observación, las siguientes dos medidas:

- Diámetro aparente del planeta (el que nosotros apreciamos), medido en segundos de arco ( $''$ ).
- Tiempo de exposición mínimo, expresado en segundos, para obtener una imagen de la galaxia donde pueda apreciarse el “disco negro”. No es necesario que en la foto se vea perfectamente la galaxia, es suficiente con que se vea el contraste entre la galaxia y el disco negro producido por la ausencia de fotones.

Imaginemos que con nuestro telescopio hacemos una foto donde vemos la galaxia mostrando un comido con la forma y tamaño del disco del planeta (el disco negro), y mas abajo la imagen del planeta, al estilo de los esquemas del ejemplo segundo. Copiamos uno de estos esquemas, solo que eliminamos los valores horarios del ejemplo, que ahora no nos sirven de nada.



Esquema de la observación con trayectoria de planeta

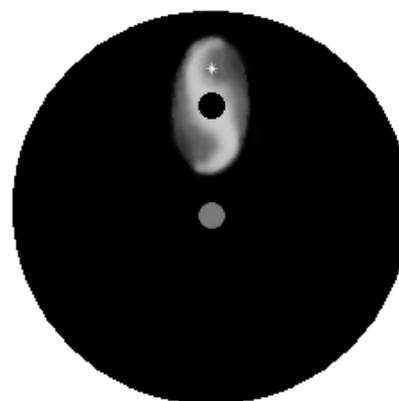


Imagen real en Telescopio

Marcamos como  $A$  la posición que ocupaba el planeta hace un tiempo, de donde salieron los fotones que nos están llegando ahora, y por ello se corresponde con la posición de la imagen del planeta que observamos ahora en la foto que hacemos con el telescopio. Marcamos como  $B$  la posición que ocupaba el planeta cuando se produjo el “comido” en la imagen de la galaxia que ahora estamos recibiendo en nuestro telescopio y queda registrada en la foto. Marcamos como  $C$  la posición “real” donde está el planeta en el momento de la observación. El movimiento del planeta desde  $A$  a  $B$  supone un ángulo de  $\Delta\alpha$  expresado en segundos de arco (visto desde nuestro telescopio).

Llamemos  $T_{planet}$  al intervalo de tiempo que necesita la luz del planeta en recorrer la distancia que hay entre el planeta y nuestro telescopio. Es el intervalo de tiempo transcurrido desde que los fotones salieron del planeta cuando estaba en la posición  $A$ , y el momento en que hacemos la foto.

Llamemos  $T_{galaxy}$  al intervalo de tiempo que necesita la luz de la galaxia en recorrer la distancia que hay entre el planeta y nuestro telescopio. Es el intervalo de tiempo transcurrido desde que los fotones de la galaxia pasaron por donde estaba el planeta, cuando este estaba en la posición  $B$ , y el momento en el que hacemos la foto.

Llamemos  $\Delta T$  al intervalo de tiempo que necesita el planeta para moverse de la posición  $A$  a la posición  $B$ .

En la fotografía que hemos hecho con nuestro telescopio aparecen 2 imágenes: la imagen del planeta, y la imagen de la galaxia con el disco negro en el centro. Estas dos imágenes están formadas por sendos grupos de fotones, que han llegado a nuestro telescopio al mismo tiempo, por eso las

vemos juntas en la misma foto.

Vamos a analizar cronologicamente cómo ocurrieron los hechos que han producido nuestra foto:

- El planeta está en la posición A. Los fotones que parten de él empiezan a recorrer la distancia que nos separa.
- A continuación el planeta se mueve de A a B, y para ello necesita el intervalo de tiempo que hemos llamado  $\Delta T$ .
- Justo cuando el planeta está en B, los fotones de la galaxia que pasan por ahí en ese momento, empiezan a recorrer la distancia que hay entre el planeta y nosotros.
- Los fotones del planeta y los fotones de la galaxia llegan al mismo tiempo a nuestro telescopio.

De la cronología de estos 4 hechos deducimos que el intervalo de tiempo que necesitan los fotones del planeta en llegar a nosotros, es igual al intervalo de tiempo que necesita el planeta para moverse de A a B, más el intervalo de tiempo que necesitan los fotones de la galaxia en recorrer la distancia entre el planeta y nosotros. Luego

$$T_{planet} = \Delta T + T_{galaxy} \quad (1)$$

A través de esta ecuación podemos deducir todo lo que necesitamos.

En la realización y análisis del experimento nos planteamos dos alternativas: El análisis a priori y el análisis a posteriori.

- Análisis a priori. Nos servirá para predecir qué registraremos en la foto de ser cierta la hipótesis que hace la teoría que supone como causa del desplazamiento al rojo de las galaxias, el aumento de la velocidad de la luz que nos llega de ellas. Según esta teoría, si una galaxia muestra un desplazamiento al rojo de  $z$ , indica que la velocidad de la luz que nos llega de ella es  $c_0(1+z)$ , siendo  $c_0 = 299792 \text{ Km/s}$  la velocidad de la luz que se considera como constante. La velocidad de la luz procedente del planeta será  $c_0$ , pues es luz reflejada del sol que no ha sufrido desplazamiento al rojo. Calculamos cuál será el ángulo  $\Delta\alpha$  que esperamos obtener en la foto, en función de la distancia entre el planeta y nosotros, la velocidad angular del planeta, y el desplazamiento al rojo de la galaxia,  $z$ .
- Análisis a posteriori. Nos servirá para obtener directamente la velocidad de la luz de la galaxia, en el caso de que observemos el disco negro sobre la galaxia. La calcularemos con ayuda de la medida del ángulo  $\Delta\alpha$ , la distancia entre el planeta y nosotros, y la velocidad angular del planeta. El valor de este ángulo lo obtendremos midiendo directamente sobre la foto que hemos hecho. No obstante, si la velocidad con que nos llega la luz de la galaxia es igual a la velocidad con que nos llega la luz del planeta, entonces  $\Delta\alpha = 0$ , y en la foto no se verá el disco negro. Ahora bien, nosotros no sabremos si el hecho de que no se vea el disco negro se debe a que  $\Delta\alpha = 0$ , o a que no hemos hecho la foto en el momento adecuado. La única forma que tenemos para comprobar directamente si  $\Delta\alpha = 0$ , sería comprobando que nos llegan las imágenes superpuestas del planeta y la galaxia cuando en nuestro telescopio vemos el planeta sobre la galaxia. Pero esto será muy difícil dada la gran diferencia de magnitudes entre el brillo de la galaxia y el brillo del planeta. Así que solo nos queda hacer varias fotos del tránsito del planeta sobre la galaxia, de forma que cubran las posibles apariciones del disco negro que pudieran darse, y de no observarse ninguna, podríamos concluir que la velocidad de la luz que nos llega de la galaxia no es mayor que la velocidad de la luz que nos llega del planeta, rechazando así la hipótesis de la teoría que supone como causa del desplazamiento al rojo de las galaxias, el aumento de la velocidad de la luz que nos llega de ellas, y corroborando la hipótesis mayoritariamente aceptada que considera la velocidad de la luz constante. Para

concluir señalamos que también podríamos seguir haciendo fotos de la galaxia después que veamos el planeta pasar sobre ella, por si se observase el disco negro sobre la galaxia siguiendo al planeta, no precediéndolo, lo cual significaría que la velocidad de la luz procedente de la galaxia nos llegaría con menor velocidad que la luz procedente del planeta. Pero dado que esta hipótesis no está sustentada por ninguna teoría, parece menos interesante y no la analizamos.

A continuación detallamos separadamente el análisis a priori y el análisis a posteriori, para concluir con un diseño mas amplio del experimento de forma que englobe todos los casos posibles.

## Análisis a priori

Los fotones del planeta tardan  $\frac{x}{c_0}$  segundos en recorrer la distancia que existe entre el planeta y nosotros, siendo  $c_0$  la “velocidad de la luz considerada como constante” expresada en  $Km/s$ , o sea  $c_0 = 299\,792\,Km/s$ . Hemos llamado  $T_{planet}$  a ese intervalo de tiempo, es decir

$$T_{planet} = \frac{x}{c_0}$$

Los fotones de la galaxia tardan  $\frac{x}{c_0(1+z)}$  segundos en recorrer la distancia que existe entre el planeta y nosotros, dado que su velocidad es  $c_0(1+z)$ . Hemos llamado  $T_{galaxy}$  a ese intervalo de tiempo, es decir

$$T_{galaxy} = \frac{x}{c_0(1+z)}$$

$\Delta T$  es el intervalo de tiempo que necesita el planeta para pasar de  $A$  a  $B$ , es decir para recorrer la distancia angular  $\Delta\alpha$ . Por otra parte, si el planeta se mueve con velocidad angular  $\omega$ , entonces en el intervalo de tiempo  $\Delta T$  se moverá la distancia angular  $\omega\Delta T$ , luego

$$\Delta\alpha = \omega\Delta T$$

con lo cual

$$\Delta T = \frac{\Delta\alpha}{\omega}$$

Ahora sustituímos en la ecuación (1) estos valores y tenemos

$$\frac{x}{c_0} = \frac{\Delta\alpha}{\omega} + \frac{x}{c_0(1+z)}$$

de aquí despejamos  $\Delta\alpha$  de la manera siguiente

$$\begin{aligned} \frac{x}{c_0} - \frac{x}{c_0(1+z)} &= \frac{\Delta\alpha}{\omega} \\ \Delta\alpha &= \frac{\omega x}{c_0} \left(1 - \frac{1}{(1+z)}\right) = \frac{\omega x}{c_0} \left(\frac{1+z-1}{1+z}\right) \end{aligned}$$

que queda definitivamente como

$$\Delta\alpha = \frac{\omega x}{c_0} \left(\frac{z}{1+z}\right) \quad (2)$$

También podemos conocer cuánto tiempo pasará hasta que la imagen del planeta esté encima del disco negro que vemos ahora. Esto es interesante para que no nos pasemos con el tiempo de exposición, pues si la imagen del planeta llega hasta el disco negro “velaría” la foto, y se nos iría al traste el experimento. Este intervalo de tiempo será el mismo que el que necesita el planeta para ir de  $A$  a  $B$ , es decir  $\Delta T$ , y si sustituímos  $\Delta\alpha$  por el valor obtenido en la ecuación (2) tenemos

$$\Delta T = \frac{\Delta\alpha}{\omega} = \frac{\frac{\omega x}{c_0} \left(\frac{z}{1+z}\right)}{\omega} = \frac{x}{c_0} \left(\frac{z}{1+z}\right) \quad (3)$$

También podemos expresar la ecuación que nos da el valor de  $\Delta T$  en función de  $T_{planet}$ , ya que

$$T_{planet} = \frac{x}{c_0}$$

y sustituyendo en la ecuación (3) quedará

$$\Delta T = T_{planet} \left( \frac{z}{1+z} \right) \quad (4)$$

Si denotamos por  $\alpha$  al ángulo definido por, la posición que ocupaba el planeta cuando emitió la luz que ahora nos llega, o sea la posición A del esquema, y la posición que realmente ocupa en este momento, la posición C, vemos que es el ángulo que se corresponde con la distancia que ha recorrido el planeta en el tiempo  $T_{planet}$ , y que no es otro que el resultado de multiplicar la velocidad angular  $\omega$  por  $T_{planet}$ , es decir

$$\alpha = \omega \frac{x}{c_0}$$

si sustitimos este valor en la ecuación (2) nos queda

$$\Delta \alpha = \alpha \left( \frac{z}{1+z} \right) \quad (5)$$

Utilizaremos las ecuaciones (4) y (5) para realizar los cálculos, pues la obtención de  $T_{planet}$  y de  $\alpha$  es relativamente sencilla, y con el valor de  $z$  podremos hallar  $\Delta \alpha$  y  $\Delta T$ .

Respecto al hecho de hacer una foto del experimento es importante servirnos del valor de  $\Delta T$ , para saber en que momento iniciar la foto, y el tiempo máximo de exposición que podremos utilizar. Si hemos obtenido con un programa que calcula órbitas de planetas, el momento exacto en que el planeta estará en el centro de la galaxia, llamemos  $t$  a ese momento, y queremos sacar la foto del disco negro en ese lugar, tendremos que “adelantar” la foto exactamente  $\Delta T$  segundos, pues ese es el intervalo de tiempo que va adelantado el disco negro sobre la posición de la imagen que vemos del planeta. O sea, que nuestra foto la iniciaremos en el momento  $t - \Delta T$ . Además, respecto al tiempo de exposición, no podemos utilizar una exposición que se acerque al valor de  $\Delta T$ , o se “velará” la foto del disco negro cuando el planeta pase sobre él.

## Análisis a posteriori

Suponemos que hemos hecho la foto y medimos sobre ella el ángulo  $\Delta \alpha$ . Sea  $C_{planet}$  la velocidad de la luz procedente del planeta, y sea  $C_{galaxy}$  la velocidad de la luz procedente de la galaxia. De la definición de velocidad como “espacio / tiempo”, tenemos que

$$C_{planet} = \frac{x}{T_{planet}} \quad (6)$$

$$C_{galaxy} = \frac{x}{T_{galaxy}}$$

En esta última ecuación sustituimos el valor de  $T_{galaxy}$  por el obtenido de la ecuación (1), es decir

$$T_{galaxy} = T_{planet} - \Delta T$$

y tenemos la ecuación

$$C_{galaxy} = \frac{x}{T_{planet} - \Delta T}$$

Sustituimos el valor de  $T_{planet}$  por el que nos da la ecuación (6),

$$T_{planet} = \frac{x}{C_{planet}}$$

y nos queda

$$C_{galaxy} = \frac{x}{\frac{x}{C_{planet}} - \Delta T}$$

Ahora multiplicamos el numerador y el denominador por  $C_{planet}$  y tenemos

$$C_{galaxy} = \frac{x C_{planet}}{x - C_{planet} \Delta T}$$

Si ahora hacemos uso de la igualdad

$$\Delta T = \frac{\Delta \alpha}{\omega}$$

tenemos que

$$C_{galaxy} = \frac{x C_{planet}}{x - \frac{\Delta \alpha}{\omega} C_{planet}}$$

que es la ecuación que necesitamos para calcular la velocidad de la luz de la galxia.

Si tomamos para  $C_{planet}$  el valor  $C_{planet} = c_0 = 299792 \text{ Km/s}$ , obtendríamos el valor de  $C_{galaxy}$  en Km/s

$$C_{galaxy} = \frac{299792x}{x - 299792 \frac{\Delta \alpha}{\omega}} \text{ Km/s}$$

## Diseño del experimento

Queremos cubrir todas las posibilidades para la velocidad de la luz que nos llega de la galaxia,  $C_{galaxy}$ , desde que sea instantánea (matemáticamente infinita), hasta que tome el valor igual a la velocidad de la luz que nos llega del planeta, esto es  $c_0$ . Entre estos dos valores extremos está el valor  $c_0(1+z)$ , que supone la teoría que queremos comprobar. Dado que el tiempo de observación en un telescopio es algo muy valioso y solicitado, intentaremos realizar el experimento con el menor número de fotos posible.

Supongamos que hemos obtenido con un programa de cálculo astronómico los datos del tránsito del planeta sobre la galaxia. Estos datos son:

- $T_0$ , el momento en el cual veremos con nuestro telescopio el planeta sobre la galaxia.
- $x$ , la distancia entre el planeta y nosotros.
- $w$ , la velocidad angular aparente del planeta, o sea, la velocidad angular respecto a nosotros.
- $z$ , el desplazamiento al rojo de la galaxia.

En el experimento hay 3 momentos importantes, que dependerán de los posibles valores de  $C_{galaxy}$ :

1.  $C_{galaxy} = \infty$ .
2.  $C_{galaxy} = c_0(1+z)$ .
3.  $C_{galaxy} = c_0$ .

Para cada uno de estos posibles valores vamos a obtener el momento en el que hacer la foto, y la separación que habrá entre la imagen de la galaxia y la imagen del planeta.

El primer caso, si  $C_{galaxy} = \infty$ . Esto quiere decir que la velocidad con que nos llega la luz de la galaxia sería instantánea, con lo cual en el mismo instante en que el planeta se posicione sobre

la galaxia, veremos la imagen de la galaxia con el disco negro en nuestro telescopio. La imagen del planeta que veremos estará separada de la imagen de la galaxia un ángulo  $\Delta\alpha$ , igual al ángulo recorrido por el planeta durante el tiempo que tarda su luz en llegar a nosotros. Este tiempo es lo que hemos llamado  $T_{planet}$ , con lo que

$$\Delta\alpha = w T_{planet} = w \frac{x}{c_0}$$

El momento para realizar esta primera foto será  $T_{planet}$  segundos antes de  $T_0$ , es decir

$$T_0 - \frac{x}{c_0}$$

El segundo caso ya lo hemos analizado en el análisis a priori, y nos daba el siguiente valor para el ángulo

$$\Delta\alpha = w \frac{x}{c_0} \left( \frac{z}{1+z} \right)$$

y para el momento en que realizar la foto habíamos calculado

$$T_0 - \frac{x}{c_0} \left( \frac{z}{1+z} \right)$$

El tercer caso es trivial, dado que el ángulo será 0, y el momento de hacer la foto será  $T_0$ .

Dependiendo de cada caso particular, habrá que hacer varias fotos o bastará con hacer una sola que englobe todos los casos posibles. Al final de este escrito hemos desarrollado un ejemplo práctico real con el planeta Marte.

## Hoja de Cálculo

Los datos necesarios para diseñar el experimento los proporcionan directa o indirectamente los programas de cálculo astronómico. Nosotros utilizaremos el programa “Cartes du Ciel”. Hemos confeccionado la hoja de cálculo en formato excell “experimento.xls”, donde introduciendo los datos que nos proporciona directamente “Cartes du Ciel”, calcula lo necesario para saber qué sucederá durante el experimento. Para ello introducimos las coordenadas de la posición aparente del planeta en dos momentos distintos, el intervalo de tiempo entre las dos posiciones, la distancia a la tierra a cada una de las 2 posiciones, el diámetro aparente del planeta y el desplazamiento al rojo de la galaxia (o la llamada “velocidad de alejamiento” de la galaxia) y la hoja de cálculo nos dá lo que necesitamos. Veamos como.

Introducimos las coordenadas de la Posición 1 y Posición 2, en el formato en que suelen darse:

Ascensión Recta (AR), en horas, minutos y segundos. Los segundos con decimales si es necesario.

Declinación (DEC), en grados ( $^{\circ}$ ), minutos de arco ( $'$ ), y segundos de arco ( $''$ ). Los segundos de arco con decimales si es necesario. Si la declinación es negativa, pondremos el signo “ - ”, pero solo en la parte de los grados de la declinación, tal y como suele hacerse.

La hoja de cálculo hallará el total en grados para cada coordenada de cada posición, y también el total en segundos de arco. Esto será necesario para el cálculo del ángulo entre las dos posiciones.

Introducimos el intervalo de tiempo entre una posición y otra, en días, horas, minutos y segundos. La hoja de cálculo sumará todo y lo expresará de 4 formas distintas que pueden ser de interés: total en días, total en horas, total en minutos, y total en segundos.

Introducimos el diámetro aparente del planeta, en segundos de arco.

Introducimos la distancia a cada una de las 2 posiciones, en Unidades Astronómicas, (U.A.). La hoja de cálculo las expresará en Kilómetros (Km), y sacará la media de las dos, también en kilómetros.

Introducimos la “velocidad radial” o “velocidad de alejamiento” de la galaxia, y la hoja de cálculo la transformará en desplazamiento al rojo, usando la ecuación del efecto Doppler relativista. Es una pena que el programa “Cartes du Ciel”, al igual que otras bases de datos, transformen el desplazamiento al rojo en “velocidad de alejamiento” y solo den este dato.

Ya no tenemos que introducir nada más. La hoja de cálculo hallará el ángulo entre las dos posiciones del planeta, que expresará de dos formas distintas que pueden ser de interés: en grados, y en segundos de arco.

Después se calcula la velocidad angular aparente del planeta y se expresa de 5 formas diferentes que pueden ser de interés: en grados por día, en segundos de arco por día, en segundos de arco por hora, en segundos de arco por minuto, y en segundos de arco por segundo.

También calcula el tiempo que tarda el planeta en recorrer una distancia igual a su diámetro, cosa que puede ser interesante para hacernos una idea del experimento.

A continuación calcula lo que hemos llamado “T-planet”, que es el tiempo que tarda la luz “normal” en recorrer la distancia que nos separa del planeta (la luz “normal” es la que se mueve a velocidad de 299792 Km/s). El resultado lo expresa de 3 formas distintas, por si es interesante: en segundos, en minutos, y en horas.

Después calcula lo que hemos llamado “Alfa”, que es el ángulo que se moverá el planeta durante el intervalo de tiempo “T-planet”, y lo expresa de 3 formas diferentes por si es de interés: en segundos de arco, en minutos de arco, y en grados.

Con todos estos datos ya podemos calcular lo que realmente nos interesa: para una galaxia con un  $z$  determinado, qué separación habrá entre el disco negro del planeta y la imagen del planeta. Es lo que hemos llamado “Delta-Alfa”. También “Delta-T”, que es el intervalo de tiempo necesario para que la imagen del planeta ocupe la posición que ahora ocupa el disco negro. Y que es el intervalo de tiempo que tendremos que “adelantar” sobre la hora prevista para la ocultación, para hacer la foto.

La hoja de cálculo muestra estos datos para diferentes valores de  $z$ , para poder hacernos una idea de como variarán los resultados en función del  $z$  de la galaxia. “Delta-Alfa” lo expresa en segundos de arco y “Delta-T” en segundos de tiempo. También expresa el ángulo “Delta-Alfa” en unidades del diámetro del planeta, o sea, cuantos diámetros del planeta separan el disco negro y la imagen del planeta.

Si queremos saber estos datos para un  $z$  que no esté en la lista, solo tenemos que cambiar uno de esos  $z$  por el que queramos.

## Ejemplo Práctico

Ensayemos con Marte el procedimiento ayudándonos de la hoja de cálculo “experimento.xls”.

Con el programa “Cartes du Ciel”, para nuestro lugar de observación, obtenemos lo siguiente:

Posición 1 del planeta:

El día 2013-09-21, a las 03h 45m 00s , Marte estará en la posición

AR = 09h 11m 49.89s

DEC = +17° 25' 27.6''

a una distancia de 2.1942 U.A. ( Unidades Astronómicas)

y con un tamaño aparente de 4.3''

Y empezará a transitar sobre la galaxia PGC 1533843, que tiene una velocidad de alejamiento de 26348 Km/s.

Diez minutos mas tarde habrá terminado el transito de Marte que estará en la posición 2.

Posición 2 del planeta:

El día 2013-09-21, a las 03h 55m 00s , Marte estará en la posición

AR = 09h 11m 51.46s

DEC = +17° 25' 21.1''

a una distancia de 2.1941 U.A.

y con un tamaño aparente de 4.3''

El intervalo de tiempo que hay entre las dos posiciones es de 10 minutos (esto lo calculamos a mano).

Introducimos estos datos en la hoja de cálculo, que automáticamente nos da todos los cálculos:

Marte se moverá con una velocidad angular media de

$$\omega = 0.03898459''/\text{segundo}$$

a una distancia media de

$$x = 328240168 \text{ Km}$$

$T_{planet}$  , el intervalo de tiempo que tarda la luz “normal” en recorrer la distancia que hay entre el planeta y nosotros,

$$T_{planet} = 1094.893019 \text{ segundos}$$

$\alpha$ , el ángulo que se mueve Marte durante ese tiempo,

$$\alpha = 42.68395772''$$

$z$  , el desplazamiento al rojo de la galaxia,

$$z = 0.09211365$$

Y en el supuesto que  $C_{galaxy} = c_0(1+z)$

$\Delta T$  , el tiempo que tenemos que adelantar la foto para observar el disco negro en la posición prevista para el planeta, o también el intervalo de tiempo que tardará la imagen del planeta en ocupar la posición del disco negro sobre la galaxia,

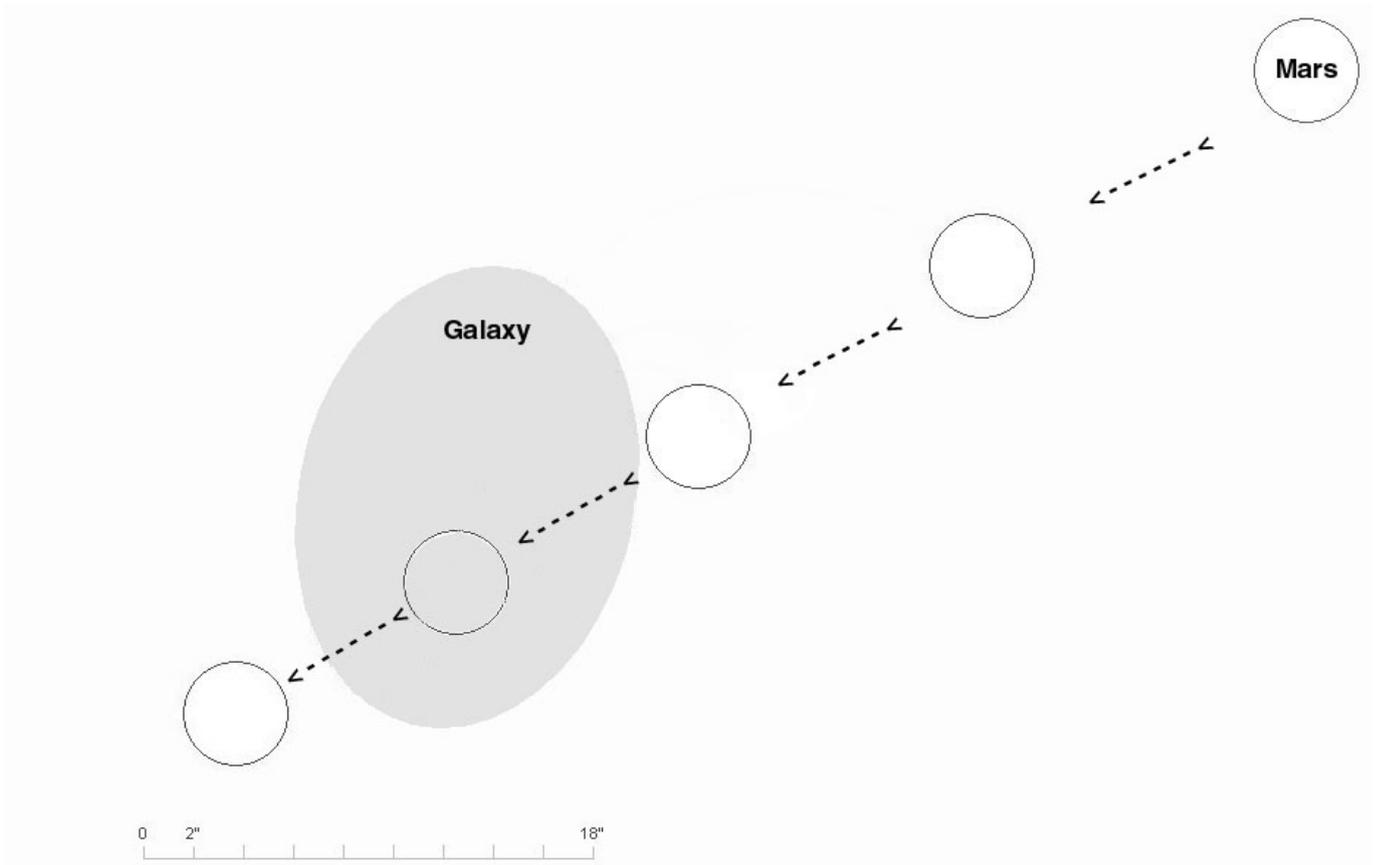
$$\Delta T = 92.3480718 \text{ segundos}$$

$\Delta\alpha$  , el ángulo de separación entre la imagen del planeta y el disco negro sobre la galaxia, y

$$\Delta\alpha = 3.60015191''$$

Diámetros de separación entre el disco negro y el planeta = 0.83724463 , es decir, el disco negro estará oculto en parte por el disco del planeta.

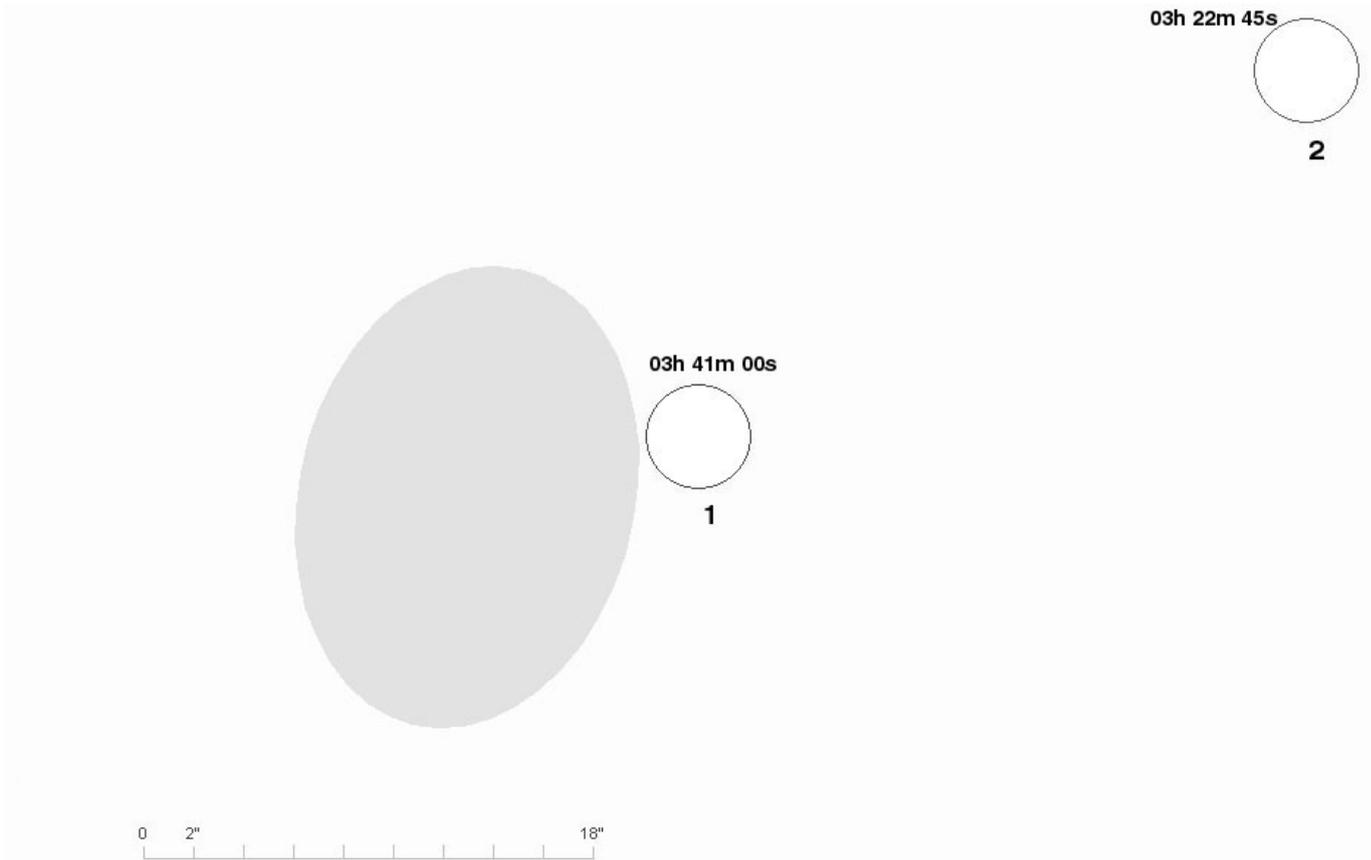
Veamos unos esquemas, capturas de pantalla del programa “Cartes du Ciel”, para hacernos una mejor idea.



En este esquema vemos la trayectoria del planeta Marte sobre la galaxia. El planeta se moverá desde el extremo superior derecho del esquema hasta el extremo inferior izquierdo. En la parte inferior izquierda tenemos una escala para los segundos de arco, ''.

En los esquemas siguientes, para cada círculo que representa la posición del planeta, anotaremos en la parte superior del círculo, una información horaria, que indica a qué hora minuto y segundo veremos al planeta en esa posición. Es importante tener en cuenta que es la posición donde veremos al planeta, que es diferente de la posición donde “realmente” estará el planeta en ese momento, que logicamente será una posición mas avanzada.

Nuestro objetivo es captar las posibles ocurrencias del disco negro que se producirían en el caso de que  $C_{galaxy}$  fuese mayor que  $c_0$ , comprendiendo todos los valores posibles, desde  $C_{galaxy} = \infty$  hasta  $C_{galaxy} = c_0$ .



La primera fase del experimento será obtener una imagen de la galaxia sin ninguna alteración por parte del planeta ni del hipotético disco negro, con el objeto de comparar posteriormente esta primera foto con las que obtengamos, y así poder detectar el disco negro. Si la velocidad con la que nos llega la luz de la galaxia,  $C_{galaxy}$ , es instantánea, entonces en el mismo momento en que el planeta se superponga a la galaxia, veremos el disco negro sobre la galaxia, es decir ese momento será cuando la posición “real” del planeta se superponga a la galaxia. Hemos remarcado “real”, pues en ese momento no veremos al planeta en esa posición, si no en una anterior. Esta posición “real” la hemos marcado en el esquema con el número “1” situado en la parte inferior del planeta. La obtenemos directamente con el programa Cartes du Ciel, de forma visual. El programa nos dice que veremos al planeta en esa posición a las 03h 41m 00s. Pero realmente el planeta estará en una posición mas adelantada de su trayectoria. Para encontrar el momento en el que el planeta esté realmente en la posición 1, hemos de restar a ese momento el tiempo  $T_{planet}$  que es el tiempo que tarda la luz a velocidad “normal” en llegar a nosotros desde el planeta, y que nos da la hoja de cálculo. Como  $T_{planet} = 00h 18m 15s$ , el momento buscado es:

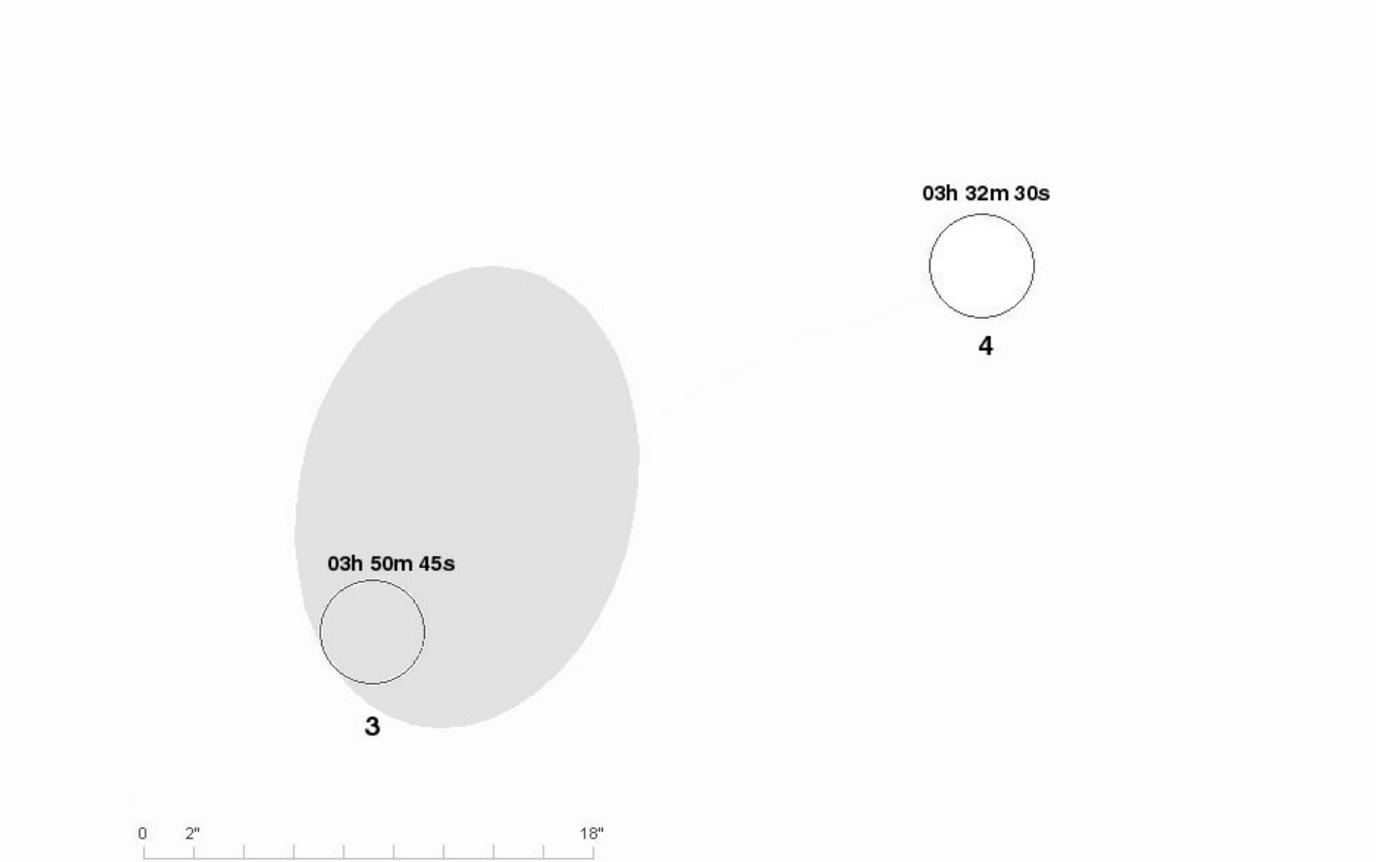
$$03h 41m 00s - 00h 18m 15s = 03h 22m 45s$$

Ahora con el programa Cartes du Ciel encontramos donde veremos al planeta en ese momento. Es la posición que hemos marcado con un “2” debajo del planeta.

Resumiendo:

a las 03h 22m 45s veremos al planeta en la posición “2”. El planeta estará “realmente” en la posición “1”, de forma que los fotones que forman la imagen de la galaxia que vemos, no pueden ser interrumpidos de ninguna manera por el planeta, puesto que no ha llegado todavía a situarse realmente delante de la galaxia. Esto nos garantiza una imagen inalterada de la galaxia, aunque  $C_{galaxy}$  fuese instantánea.

Así que ya tenemos el momento para hacer nuestra primera foto, la foto que nos servirá para comparar la siguientes fotos: Las 03h 22m 45s o cualquier momento anterior.



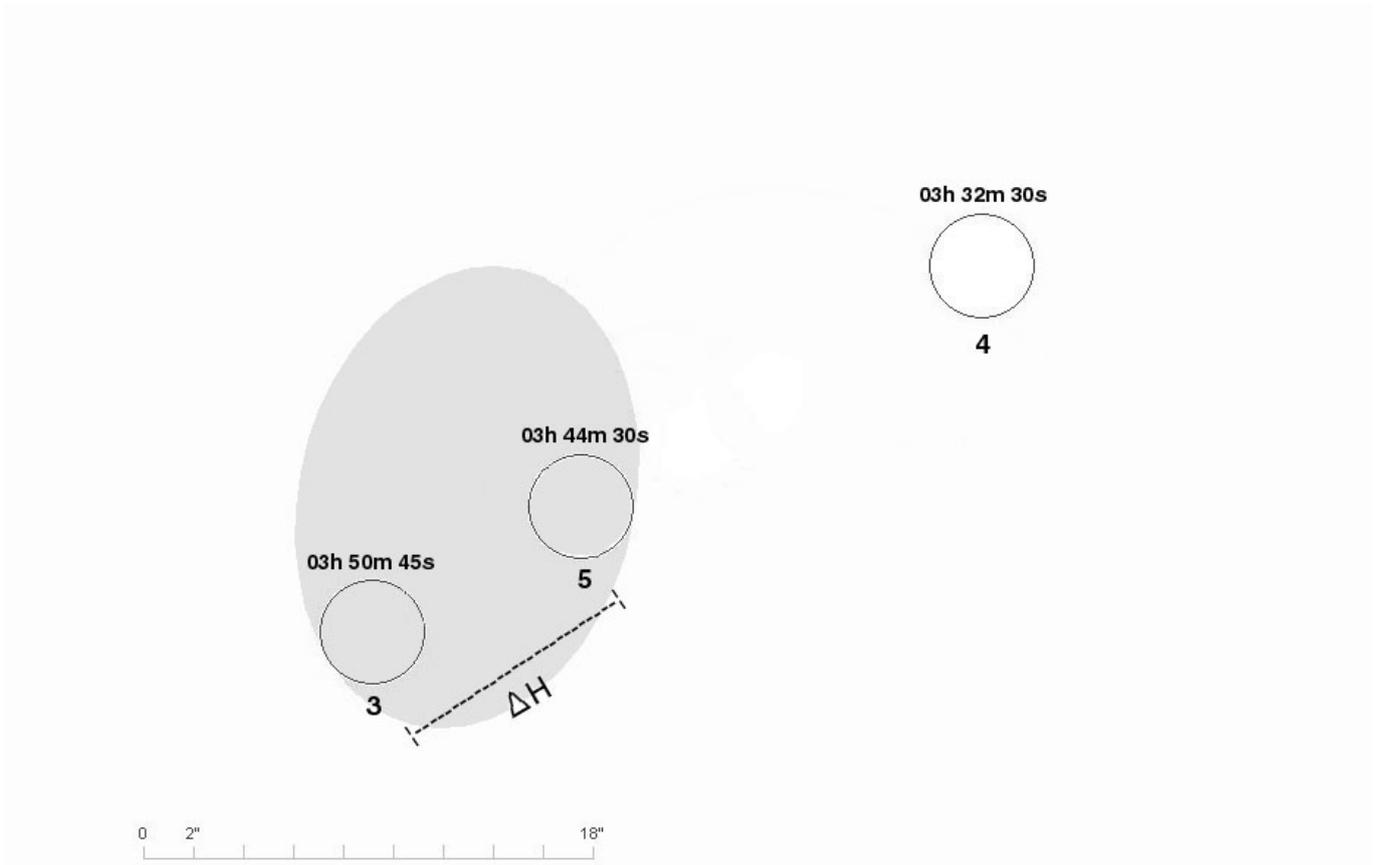
Si  $C_{galaxy}$  es mayor que  $c_0$ , veremos el disco negro precediendo a la imagen del planeta a una distancia que como mucho, cuando  $C_{galaxy}$  fuese instantánea, será la que hay entre las posiciones 1 y 2 del esquema anterior, y que hemos llamado  $T_{planet}$ . Para cumplir nuestro objetivo hemos de observar todas las posiciones intermedias entre la 1 y la 2, pero solo podemos observar el disco negro cuando está sobre la galaxia. Para calcular el momento para hacer la siguiente foto, obtenemos visualmente con el programa Cartes du Ciel, el momento en que veremos al planeta sobre la galaxia y a punto de abandonarla, es la posición que hemos marcado como 3, pero al igual que antes, este es el momento en que veremos al planeta en esa posición, para calcular cuando estrá allí realmente el planeta, restamos a ese momento  $T_{planet}$  y nos queda:

$$03h 50m 45s - 00h 18m 15s = 03h 32m 30s$$

A continuación obtenemos con el programa Cartes du Ciel la posición donde veremos al planeta en ese momento. La hemos marcado como 4 en el esquema.

Resumiendo: la 2ª foto la haremos a las 03h 32m 30s, y veremos al planeta en la posición 4, aunque realmente estará en la posición 3, a punto de abandonar la galaxia.

Si la galaxia fuese mas amplia, de forma que la posición 4 estuviese también dentro de la galaxia al igual que la posición 3, entonces haciendo una foto en este momento captaríamos cualquier ocurrencia del disco negro que se diera, para cualquier velocidad  $C_{galaxy}$ . Si  $C_{galaxy} = \infty$  el disco negro se observaría en la posición 3. Si  $C_{galaxy} = c_0$  el disco negro se observaría en la posición 4, superpuesto con el planeta, y no se vería. Y para cualquier valor intermedio de  $C_{galaxy}$ , el disco negro se observaría en una posición intermedia entre 3 y 4. Pero dado que la galaxia no es lo suficientemente amplia, tendremos que hacer alguna foto mas para captar todos los valores intermedios.

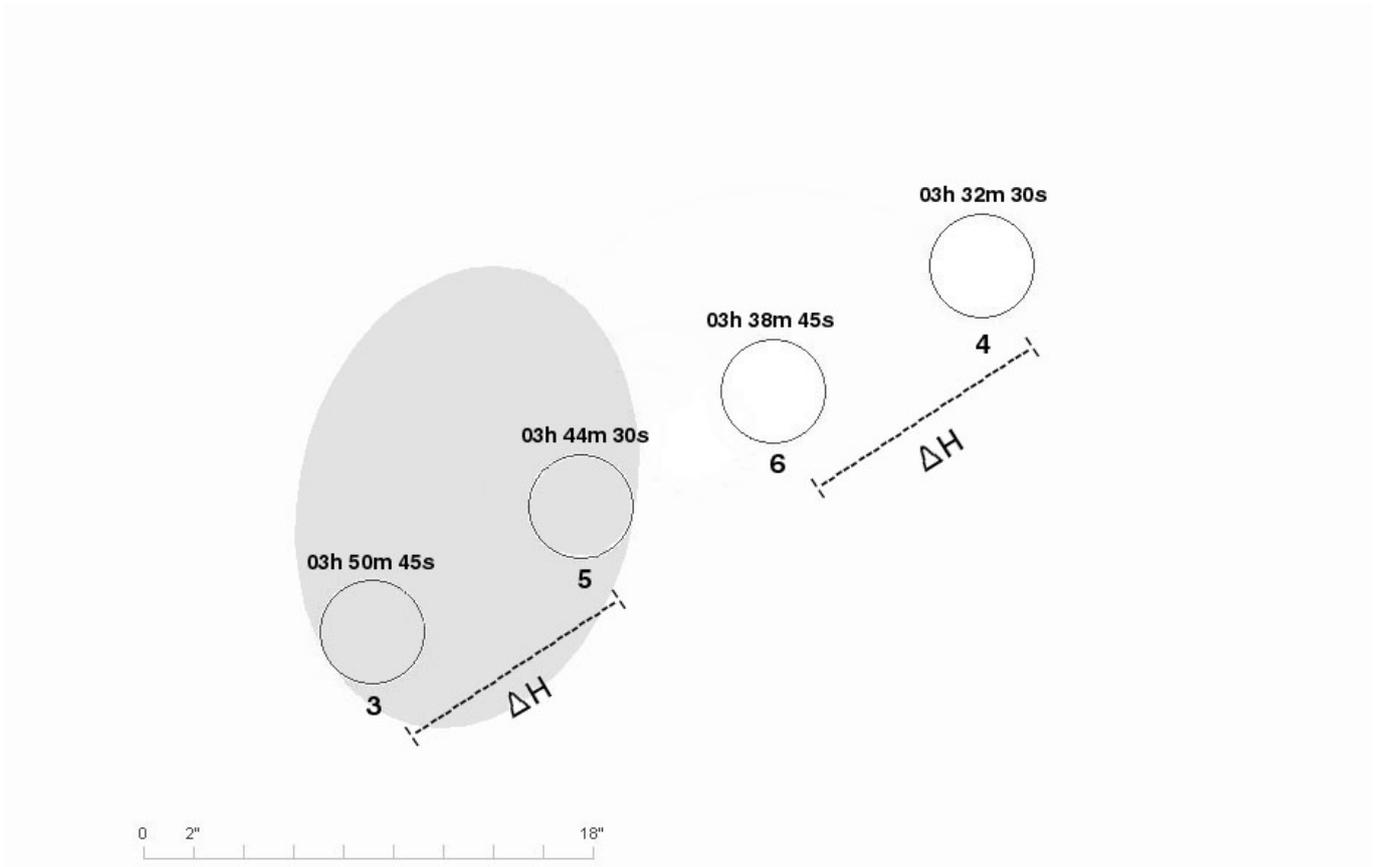


Con el programa Cartes du Ciel obtenemos visualmente el momento en el que veremos al planeta cuando acaba de sobreponerse a la imagen de la galaxia. Marcamos esta posición como 5. Entonces si hacemos la 2ª foto a las 03h 32m 30s, cuando observamos al planeta en la posición 4, observaríamos cualquier ocurrencia del disco negro que se produjese entre las posiciones 3 y 5. Recordamos que en este momento, las 03h 32m 30s, veríamos el disco negro en la posición 3 si  $C_{galaxy}$  fuese instantánea, es decir no puede darse el disco negro en una posición mas alejada de 4 que la 3.

A continuación calculamos la diferencia horaria entre las posiciones 3 y 5, que hemos llamado  $\Delta H$ ,

$$\Delta H = 03h 50m 45s - 03h 44m 30s = 00h 06m 15s$$

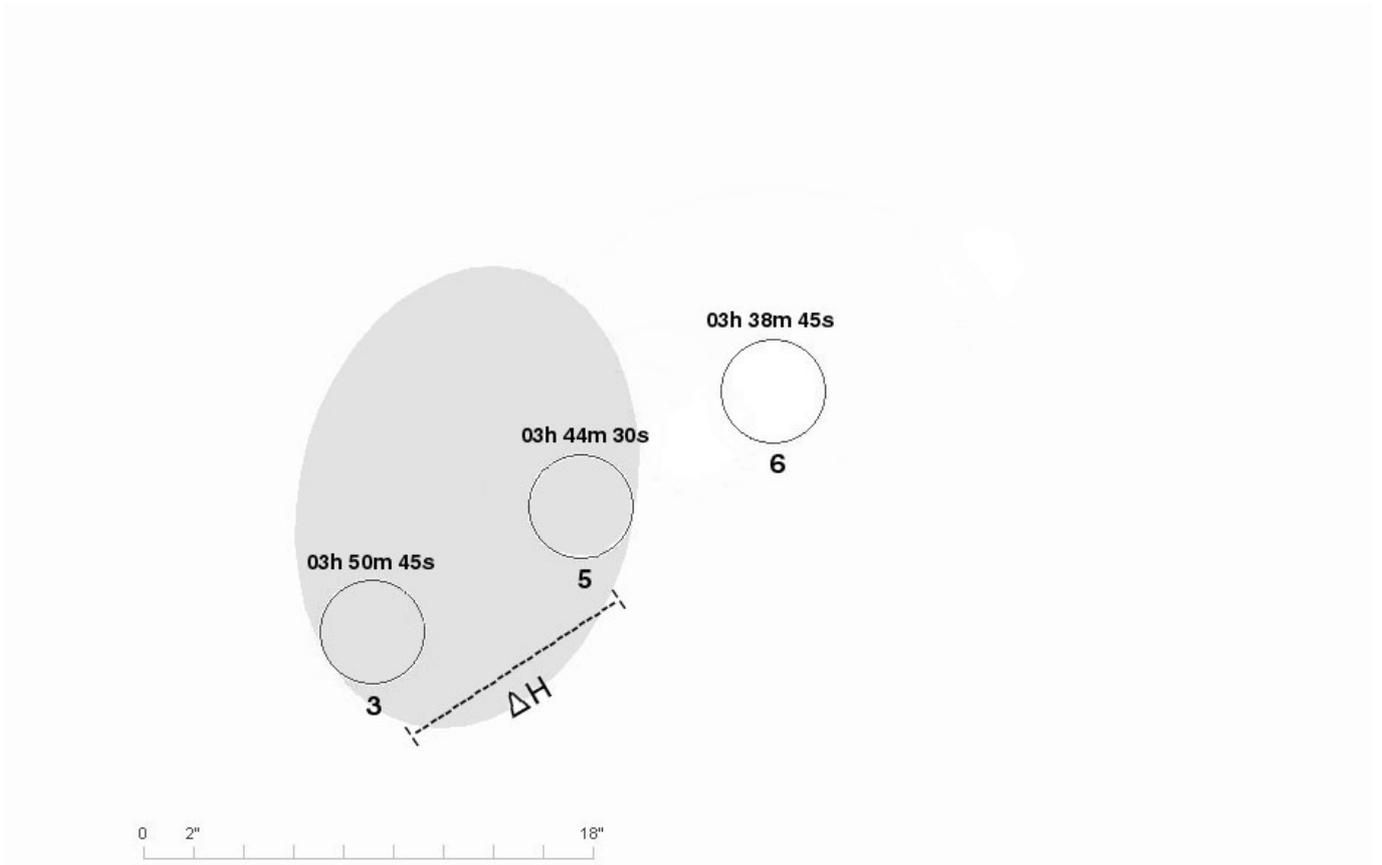
$\Delta H$  representa el segmento o intervalo de posiciones del disco negro que capturamos con una sola foto. En total hemos de cubrir con sucesivas fotos los 18m 15s ( $T_{planet}$ ) que separan las posiciones 4 y 3, donde cada foto cubrirá 6m 15s ( $\Delta H$ ) de estos 18m 15s.



Para calcular cuando haremos la siguiente foto, la 3ª, sumamos  $\Delta H$  al momento de la posición 4 y queda

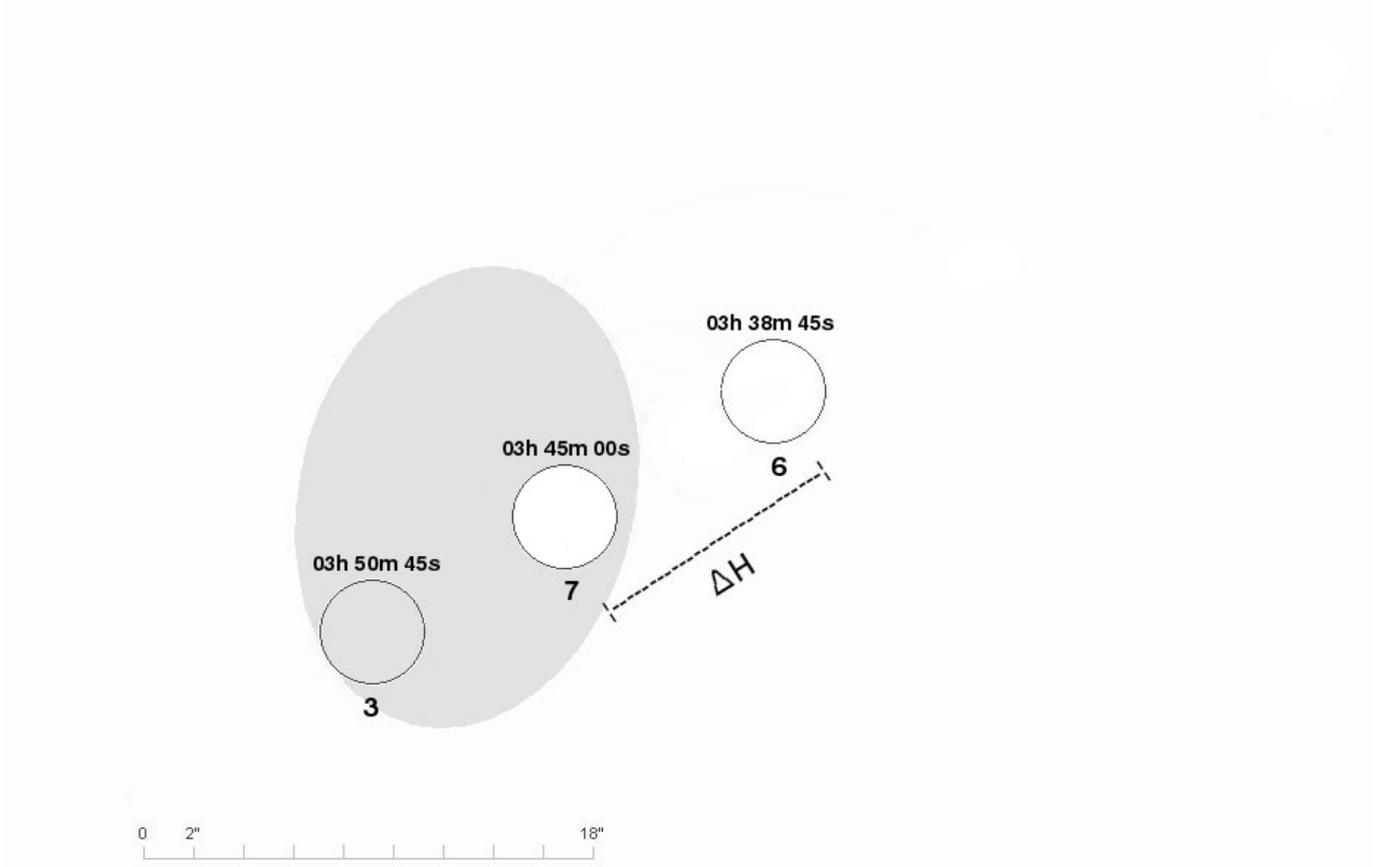
$$03\text{h } 32\text{m } 30\text{s} + 00\text{h } 06\text{m } 15\text{s} = 03\text{h } 38\text{m } 45\text{s}$$

Con el programa Cartes du Ciel obtenemos la posición del planeta para ese momento. Es la marcada con 6.



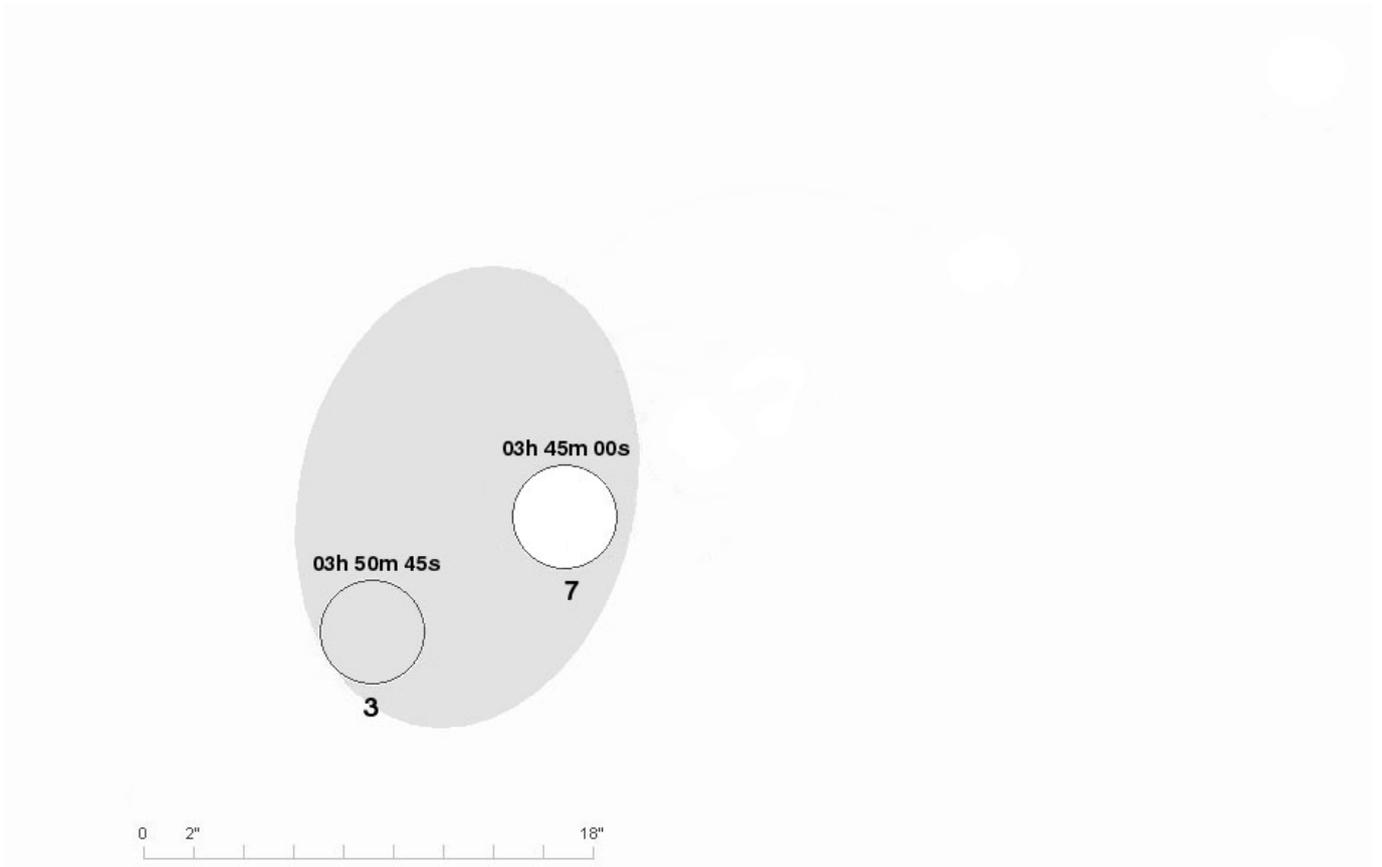
Si hacemos la foto en este momento, 03h 38m 45s, las ocurrencias del disco negro que observaríamos estarían entre las posiciones 3 y 5. Hacemos notar que si en la foto anterior, la 2<sup>a</sup>, hubiésemos observado el disco negro en la posición 5, en esta foto, la 3<sup>a</sup>, observaríamos el disco negro en la posición 3, pues la distancia angular que se ha movido el planeta es la misma que la que se ha movido el disco negro,  $\Delta H$ .

Con la 2<sup>a</sup> foto y con la 3<sup>a</sup>, ya hemos cubierto  $2\Delta H$  minutos de los  $T_{planet}$  minutos, o sea  $2 \times 06m 15s = 12m 30s$  de los 18m 15s. Nos quedan pues por cubrir 05m 45s, que es menor que  $\Delta H$ , luego si hacemos otra foto, la 4<sup>a</sup>, con el mismo procedimiento, habremos terminado.



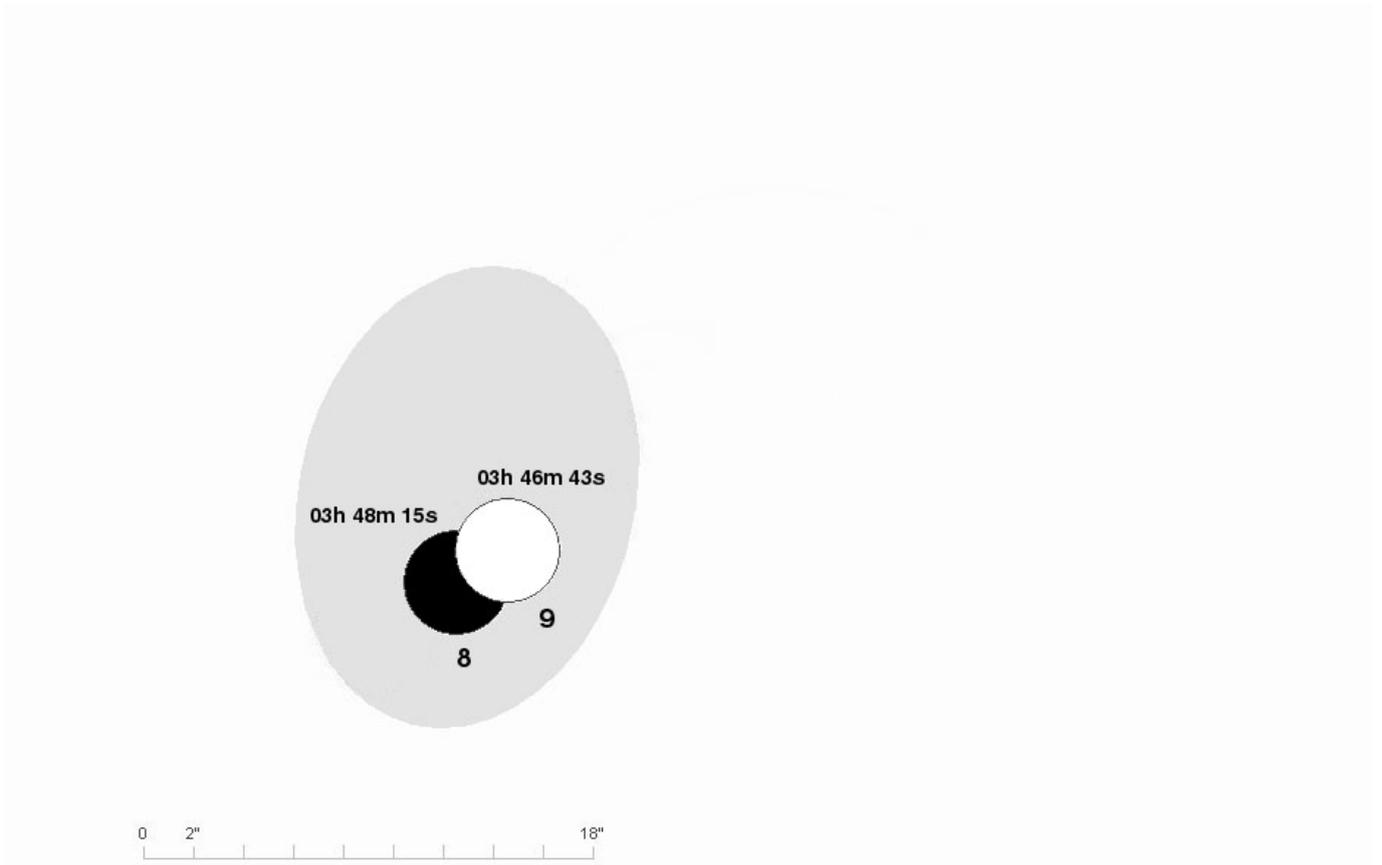
Para hacer la 4ª foto sumamos  $\Delta H$  a la posición 6 y obtenemos  
 $03h\ 38m\ 45s + 06m\ 15s = 03h\ 45m\ 00s$

A continuación calculamos con el programa Cartes du Ciel la posición donde veremos al planeta en ese momento. En el esquema la hemos marcado como 7. Vemos que está dentro de la imagen de la galaxia, con lo cual ya no necesitamos hacer más fotos.



Este es el esquema para la 4ª foto, a las 03h 45m 00s. Veremos al planeta en la posición 7 y captaremos todas las ocurrencias del disco negro que se produjesen entre las posiciones 3 y 7.

Resumiendo: Con la 1ª foto para comparar y las 3 fotos siguientes para detectar el posible disco negro, habremos cubierto cualquier posibilidad de que  $C_{galaxy}$  sea mayor que  $c_0$ . Este es el menor número de fotos necesario para realizar el experimento en este caso concreto.



Podríamos hacer una foto mas con el criterio de confirmar o rechazar directamente la teoría que afirma que  $C_{galaxy} = c_0(1+z)$ , buscando la mejor ocurrencia para comprobar esto, que será cuando el disco negro se sitúe en la parte mas brillante de la galaxia, para así poder detectarlo mejor. Si suponemos que la parte mas brillante de la galaxia está en la zona central, con el programa Cartes du Ciel encontramos visualmente el momento en que veremos al planeta en esa posición central, que hemos marcado como 8 y sucederá a las 03h 48m 15s. A este momento le restamos el intervalo de tiempo que va adelantado el disco negro respecto a la posición que vemos del planeta, que hemos llamado  $\Delta T$  y cuyo valor nos ha dado la hoja de cálculo:  $\Delta T \simeq 92$  segundos = 01m 32s y nos queda  $03h 48m 15s - 01m 32s = 03h 46m 43s$

A continuación con el programa Cartes du Ciel encontramos la posición donde veremos al planeta en ese momento. La hemos marcado como 9.

Es decir, haremos la foto a las 03h 46m 43s y según la teoría que queremos comprobar, veremos al planeta en la posición 9, y el disco negro en la posición 8, tapado en parte por la imagen del planeta, tal y como muestra el esquema.

Recordamos que según esa teoría, si hiciésemos la foto en otro momento distinto, obtendríamos la misma separación entre el disco del planeta y el disco negro, pues los dos se mueven a la misma velocidad, siguiendo la imagen del planeta la trayectoria del disco negro.

## Apunte final

En fin, esperamos que con esto haya quien se anime a realizar este experimento, tan interesante como difícil, y que nosotros sepamos, no se ha hecho nunca. Por otra parte decir, que si el experimento se realiza correctamente y no se aprecia disco negro alguno, será prueba de que la velocidad de la luz procedente de esa galaxia es la misma que la velocidad de la luz que refleja el planeta, cosa que también tiene su interés científico, en cuanto corroboraría la teoría hoy día ampliamente aceptada sobre la constancia de la velocidad de la luz.

Hemos iniciado la búsqueda de transitos planetarios sobre galaxias, con el fin de realizar el experimento. Los resultados que obtengamos los iremos poniendo en la página web

<http://webs.um.es/aha2>

de forma que la persona interesada pueda utilizar el que mejor se adecue a su lugar de observación y al instrumental de que disponga.

Una copia en pdf de este escrito puede encontrarse en

<http://webs.um.es/aha2/UI/E/exper.pdf>

Una copia de la hoja de cálculo se encuentra en

<http://webs.um.es/aha2/UI/E/exper-hc.xls>

También hay una copia de la teoría que afirma que  $C_{galaxy} = c_0 (1 + z)$  en

<http://webs.um.es/aha2/UI/r3.pdf>

Damos las gracias al lector por haber llegado hasta aquí, demostrando su interés por la astronomía, y por el conocimiento del Universo.

Escrito en Murcia a 27 de Mayo de 2011

Antonio Hernández Alemán

[aha2@um.es](mailto:aha2@um.es), [eufrouno@gmail.com](mailto:eufrouno@gmail.com)

Agradeceremos que se difunda el contenido de este escrito, para lo cual autorizamos expresamente su reproducción total o parcial por cualquier medio o procedimiento.