

revista **NaDiR**

Nº 46 III-2021

**LA CAMBIANTE IMAGEN DE
LA DAMA DE LA NOCHE**

**DIVULGACIÓN DE LA
COSMOLOGÍA: ESTUDIO DE
UN CASO**

**EL DESCUBRIMIENTO DE LOS
CIELOS DEL HEMISFERIO SUR**

**MODELOS PARA ENSEÑAR
ON LINE LA VIDA DE LAS
ESTRELLAS**

**ESTIMACIÓN DE LA
DENSIDAD DE JÚPITER CON
SUS LUNAS**

**ECLIPSE 10-6-2021:
BASES DEL CONCURSO**

**REVISTA DE LA ASOCIACIÓN PARA LA
ENSEÑANZA DE LA ASTRONOMÍA (ApEA)**



**ASOCIACIÓN
PARA LA ENSEÑANZA
DE LA ASTRONOMÍA**

ApEA

NADIR es una revista de la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía (ApEA)
www.a pea.es

Presidente:

Carolina Clavijo Aumont

Vicepresidente:

Sebastián Cardenete García

Secretario:

Fernando Sánchez Gil

Tesorero:

Xavier Benlliure i Perales

Vocal de Publicaciones:

Ricardo Moreno Luquero

Vocal página web:

Eva Dominique Ibarra

Vocal FAAE:

Ángel Gómez Roldán

Vocales de Encuentros:

M. Carmen Botella

Fernando Ordóñez

Vocales:

Esteban Esteban Peñalba

Sensi Pastor Rodríguez

Manu Arregi Biziola

Edición de la revista Nadir:

Ricardo Moreno Luquero

rmluquero@gmail.com

Comité de Redacción:

Manu Arregi y Joaquín Álvaro

Depósito Legal: Z-2513-98

ISSN: 1575-7528

Marzo 2021

Foto de portada: LRO. NASA Goddard Space Flight Center from Greenbelt, MD, USA

SUMARIO

DIDÁCTICA

LA CAMBIANTE IMAGEN DE LA DAMA DE LA NOCHE

Erik Enciso y Esteban Esteban 3

DIDÁCTICA

DIVULGACIÓN DE LA COSMOLOGÍA: ESTUDIO DE UN CASO

Juan Tomé 13

HISTORIA

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS CIELOS DEL HEMISFERIO SUR

Juan Carlos Terradillos 23

MATERIALES

MODELOS PARA ENSEÑAR ON LINE LA VIDA DE LAS ESTRELLAS

Ricardo Moreno 31

EXPERIENCIAS

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE JÚPITER CON SUS LUNAS

Anicet Cosials 34

CONCURSO

ECLIPSE 10-6-2021: BASES DEL CONCURSO DE ApEA

50

Nadir no se hace responsable de las opiniones expresadas en los artículos. Si no se indica otra cosa, las imágenes son propiedad de los autores de los artículos.

La distribución de **Nadir** es gratuita entre los socios de ApEA, y se puede descargar de su web.

Se autoriza la difusión del contenido de la revista, citando la fuente.

LA CAMBIANTE IMAGEN DE LA DAMA DE LA NOCHE

Erik Enciso y Esteban Esteban



Las fases de la Luna, espectáculo extraordinario que por repetitivo no llama la atención, pero puede prestarse a interpretaciones poéticas: Luna estrecha como una anguila, serpenteando entre elementos vegetales, o barriguda como una embarazada, ya dando (a) luz.

La Luna. Selene. Nuestro satélite. Símbolo de la noche y de lo femenino. El astro más observado. Adorada por todas las culturas antiguas. Icono de los enamorados. Musa de los poetas. Marcadora del paso del tiempo. Un astro con el que se puede aprender mucho.

En este artículo, después de una breve introducción, hablaremos de las fases y los momentos de visibilidad, de la duración de las lunaciones, del periodo de traslación de la Luna y de los ciclos de diferente duración.

1- Introducción

La Luna tiene fases. En las películas de ciencia ficción salen muchos astros en fase, pero en nuestro cielo, sin telescopio, es el único. Además en todo el Sistema Solar es el segundo satélite que más grande se vería

desde su planeta. Todo un espectáculo al que nos hemos acostumbrado, pero que si hipotéticamente viviésemos en otro lugar como Mercurio, Venus e incluso Marte, y llegáramos a la Tierra, sería algo que nos dejaría obnubilados.

Esos cíclicos cambios debieron ser para los antiguos, además de un recurso para medir el tiempo, un símbolo de los ciclos naturales. Un símil de la vida, incluso acorde con las creencias de reencarnación de algunas religiones: del nacimiento, crecimiento, plenitud, decadencia y muerte... que volvía a resurgir en un nuevo ciclo vital, o incluso como en algunos ciclos de plantas o animales que deben morir para que surja su descendencia.

Pero sabemos que todo eso no es magia, sino una consecuencia lógica de la mecánica celeste, de las posiciones del Sol que ilumina siempre la mitad de la esfera lunar, y únicamente la perspectiva con que la vemos desde aquí hace que parezca una función dinámica.

Una actividad que puede ser interesante en los colegios de primaria e incluso también en los institutos sería que un día soleado se simule con una bola blanca el movimiento de la Luna en torno a la Tierra, en sentido antihorario, como en la Figura 1: un grupito de chicos situados juntos representarían la posición de la Tierra, y éstos visualizarían las diferentes fases de la bola que es movida por otro a su alrededor, la forma de letra D en el cuarto creciente o de C en menguante, mientras que otro grupo situado algo más alejado verá que prácticamente no cambia la fase. Aunque parezca algo simple, mucha gente no tiene interiorizada la situación y así lo aprenderían.

2- Fases y momentos de visibilidad

La Luna es el símbolo de la noche, pero muchos se sorprenden de que también pueda verse de día. Muchas personas no lo saben, pero los momentos de la noche, (o del día) en que la Luna está por encima del horizonte y puede verse dependen totalmente de la fase.



Fig. 1.

La Luna nueva lógicamente no se ve nunca, cuando está llena se ve toda la noche, pero en menguante la podremos ver por la mañana y jamás al principio de la noche, o cuando crece tampoco la veremos de madrugada pero sí por la tarde. Esto, que en el medio rural de hace años era conocido por casi todo el mundo, actualmente no lo saben ni muchos profesores de ciencias de bachiller, y un catedrático me lo discutía “que eso no tiene nada que ver con la fase” me dijo una vez.

Pero, como todos los conocimientos, en la escuela no debería explicarse en un plis plas, sino que los niños lo deberían descubrir por sus propios medios siempre que eso sea posible. Si son ellos los que se han dado cuenta con sus observaciones, serán mucho más receptivos a la explicación.

Para ello hay que darles una tabla con cuadros y círculos en blanco como la de la figura 2, y cada vez que vean la Luna deberán dibujar la forma que tiene con la orientación exacta (sombreado la zona que no se ve) y apuntar la hora en que la ven. Deberán reunir todos los datos posibles al menos durante 2 meses, y mejor 3. Si prefieren, pueden fotografiarla con el móvil con mucho zoom, aunque no estoy seguro

si con todos los móviles será suficiente, (insistirles en que lo pongan bien horizontal) antes de copiar la imagen al papel.

También deberían apuntar los momentos en que estando el cielo despejado, de noche, no se vea la Luna.

Datos de la observación de la Luna					
fecha y hora	fase		fecha y hora	fase	
7-12 19:30					
9-12 20h					
10-12 20:15					

Días en que estando despejado, no se ve la Luna:

Día	Hora	Día	Hora	Día	Hora
10-12	8				

Fig. 2. Cuadrante que ha recogido ya los primeros datos de observación.

Si ese trabajo se valora para nota, es muy probable que alguien haga trampa, dibuje bien la fase copiándola de un calendario, pero ponga mal la hora en que dice que la vio, o la inclinación de la Luna a esa hora, porque eso en el calendario no viene. Cuando entreguen los datos el profesor deberá reprenderle: “Esa está mal”. No se le dice el porqué. Se le echa la bronca, un negativo, y que averigüe por qué se ha dado cuenta, con lo que seguramente aprenderá.

Después de que hayan recogido gran cantidad de datos (varias hojas) deberían juntarse por grupos de 4 o 5 y que compartan, analicen y saquen conclusiones, siguiendo las indicaciones de la ficha de la Figura 3. Pero antes de eso el profesor debería haberles pedido y revisado todas las hojas de datos (es mucho trabajo, pero seguro que menos que corregir exámenes), y eliminado las “trampas”. Esta revisión podría hacerse después del primer mes, para corregir esa posible “metodología errónea” en la toma de datos antes mencionada, y luego también al final para evitar que un dato incorrecto lleve al error a todo el grupo.

FICHA SOBRE LAS FASES Y VISIBILIDAD DE LA LUNA

En la columna de la derecha del dibujo de cada luna escribe en qué fase está (creciente, menguante o llena). Para ello puedes fijarte en qué lado está la parte iluminada, y si tienes varios días seguidos comprueba si va creciendo o menguando, y en uno u otro caso dónde está esa zona iluminada.

Una vez completadas las anotaciones de la fase, contesta a las siguientes preguntas:

- ¿A qué horas corresponden las observaciones cuando está creciente? ¿Por la tarde o por la mañana? _____
- Es siempre igual? _____
- ¿Y cuando está menguante? _____
- ¿Y cuando está llena? _____
- En los días que no viste la Luna, comprueba si en ese día o en días cercanos tienes alguna anotación, y piensa: _____
- ¿Por qué crees que no la viste? _____
- ¿Qué conclusiones puedes sacar sobre los momentos en que se puede ver la Luna según su fase? _____

Si crees que alguno de los datos no encaja con estas conclusiones generales, coméntalo con tus compañeros o con el profesor.

- Piensa en la forma en que se producen las fases, el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, y el sentido de la rotación terrestre, e intenta encontrar la explicación a las conclusiones que sacaste a partir de las observaciones. Tu profesor te ayudará.

Fig. 3. Ficha de trabajo.

Luego se les explicará todo con el típico gráfico que sale en todos los libros de las fases de la Luna o repitiendo nuevamente la primera actividad en el patio de la anterior figura 1, pero ahora fijándose también en el momento del día en que es visible la Luna. Estarán más atentos que si solo se les explica desde el principio antes de observar, para averiguar el por qué ocurre eso tan raro de lo que se han dado cuenta ellos, o les ha costado una mala nota si hicieron trampa.

3- Duración de las lunaciones

Esto podría parecer que ya se lo sabrán, ¡pero no!. Lo descubrirán y se sorprenderán un montón porque hay algo muy curioso: Incluso hoy, en la sociedad de la información que todo se sabe, casi todo el mundo cree que los ciclos de las fases lunares duran 28 días, pero es mentira. Yo alucino y no tengo ni idea de porqué casi todos creen eso, pero es que sale hasta en algunos libros serios de divulgación científica.

¡Hasta podría ocurrir que los chicos hicieran trampa para que sus observaciones cuadren con eso de los 28 días!

El conseguir que por sus propios medios y sus observaciones encuentren algo que es diferente de lo que pensaban, y de lo que dice todo el mundo, les haría irse arriba y sería todo un punto para desarrollar hábitos y vocaciones científicas. La similitud con el caso de Copérnico y otros muchos les alentaría y les haría sentirse científicos.

El cálculo de la duración del ciclo de fases lunares podría hacerse de dos maneras diferentes, aunque la primera es mucho mejor.

Opción A) Con los datos de los cuadrantes:

Después de la explicación anterior (apartado 2) se juntarán nuevamente por grupos de 4 o 5 y harán lo siguiente:

- Deben buscar dibujos de parejas de lunas que sean iguales (primero de los datos de una cada uno y luego ampliarlo con los datos de todo el grupo)

- Apuntar la diferencia en días de una a otra, repetir con otro dibujo igual,... Saldrá una lista de números. Por ejemplo: 30, 59, 29, 30, 58, 31, 89, 28,... Habrá pequeños errores, pero no importa:

- Mirar todos esos números y buscar patrones. Se darán cuenta que hay periodos cercanos a un mes, o a dos meses, o tres meses (o a múltiplos de 30), y deducirán que en el caso de 2 meses es porque el ciclo se ha repetido aunque no pudieron obtener la finalización del primero, porque de ese día no hay datos, estuvo nublado, hubo fútbol y nadie miró la Luna, etc. Entonces dividirán entre 2.

Está claro que los dibujos no serán exactos, habrá errores de uno o dos días, pero entre todos los datos de toda la clase se hace la media, con lo que siempre saldrá un valor muy cercano al real. Se redondea un poco si es necesario (quizás alguna décima) y siempre se obtendrá como resultado 29.5 días. Muchos dirán ¡Solo nos equivocamos por un día y medio, que son 28! Pero el profesor les contestará: ¡No! habéis obtenido el resultado correcto.



Fig. 4.

Opción B) Si todo este método parece demasiado largo, la climatología es mala o los chicos no están por la labor, puede hacerse usando un calendario, contando a lo largo de todo el año (o incluso varios años seguidos) las diferencias en días entre las lunas nuevas (u otra de las fases). Se van obteniendo siempre los valores 29 o 30 días, y se hace la media.

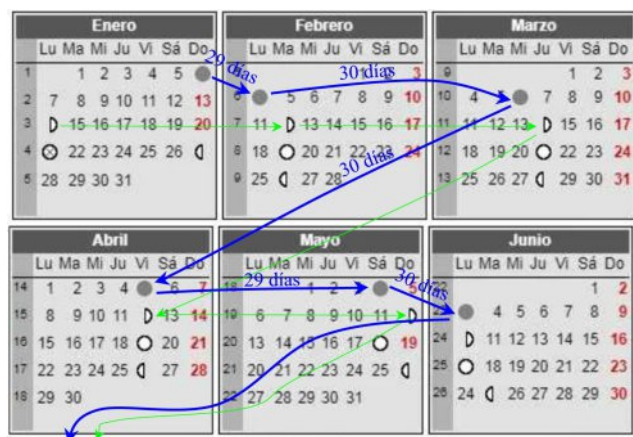


Fig. 5. En este caso el proceso es muy fácil, muchísimo más corto, pero es mucho menos gratificante.

4- Periodo de traslación de la Luna

Pero, ¡claro! no es lo mismo la duración del ciclo de las fases que el tiempo que la Luna tarda en dar una vuelta a la Tierra respecto a una referencia lejana, como las estrellas, porque en ese tiempo la Tierra se va moviendo alrededor del Sol y la cosa cambia, como se recoge esquemáticamente en la figura 6. Tanto en la posición 1 como en la 3 hay luna nueva, pero ya en la 2 la Luna completó su traslación.

El periodo de traslación de nuestro satélite es mucho menos evidente y más difícil de descubrir, al igual que los diferentes periodos sidéreos de otros astros, porque los observamos desde

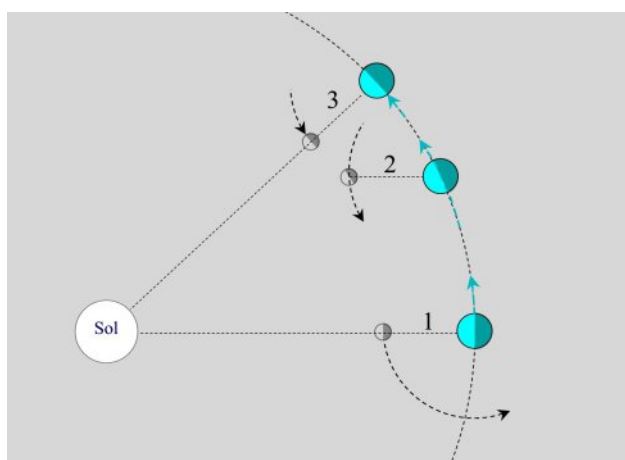


Fig. 6.

nuestro planeta, que se está moviendo: A mí se me ocurren 3 métodos que se les podrían proponer a los chicos.

El más bonito es el primero (A) porque parte también de la observación. El segundo (B), utilizando el ordenador, es el más fácil y hoy en día sería el preferido por los chicos, porque les encantan las nuevas tecnologías. El tercero (C) utiliza cálculos matemáticos. Les parecerá el más complicado, pero explicándolo bien lo entenderán y sentirán una gran satisfacción porque han sido capaces de obtener el resultado por sus propios méritos y además verán el valor de las matemáticas, odiadas por muchos estudiantes, que les parecen difíciles y no ven sus utilidades prácticas.

Opción A)

Observando cuando la Luna aparece junto a una estrella brillante (que ya conocen o que se les enseña) y contando los días que tarda en volver a estar junto a ella. Habrá que hacerlo varios meses para obtener la media, ya que no salen días exactos, aunque también podrían calcularlo aproximadamente solo con un par de acercamientos estimando el tramo que le falta un día para llegar junto a la estrella y lo que se ha pasado al día siguiente.

Para utilizar este método antes deberían familiarizarse con el cielo, aprender algo de constelaciones, o seguir diariamente a la estrella de referencia si la climatología de la región es buena, no sea que la confundan con otra viendo cualquier día que la Luna vuelve a estar al lado de una estrella brillante.

Sería adecuada, como referencia, cualquier estrella brillante cercana a la eclíptica como Aldebarán, Spica, Antares o Régulus, (o incluso otras más débiles pero más cercanas a dicha línea como Zubin el genubi de Libra o Acrab de Escorpio), que se elegiría según la época del año para que fuera visible durante el principio de la noche varios meses seguidos.



Fig. 7. La Luna cerca de Spica en una imagen en que aparecen otras varias estrellas que también podrían servir de referencia. Hay que tener cuidado con los planetas, que no nos valen porque cambian de posición.

Opción B)

Haciendo observaciones simuladas con el programa Stellarium el procedimiento sería el mismo. Incluso si se utiliza este recurso puede elegirse cualquiera de las estrellas mencionadas en cualquier época del año porque con la opción de eliminar la atmósfera, también de día se ve el cielo negro y aparecen las estrellas:

- Se elige una estrella de las citadas antes con la opción búsqueda y se fija en el centro de la pantalla. Si aparece debajo del horizonte se van adelantando horas hasta que salga y esté a buena altura y, si entonces es de día, se pulsa la opción de eliminar la atmósfera, o se adelanten 6 meses y 12 horas y aparecerá de noche.

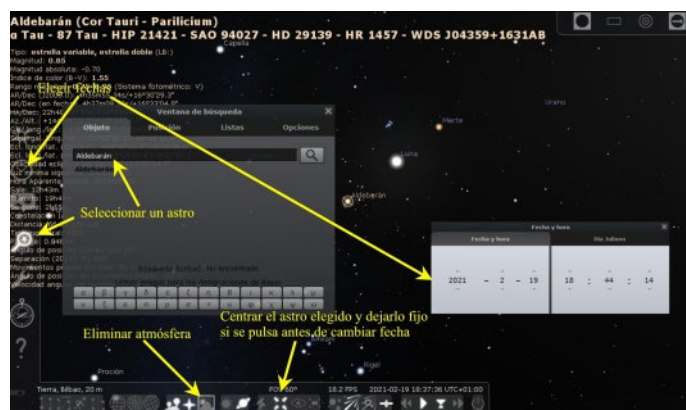


Fig. 8.

- Se continúa manteniéndola quieta en el centro de la pantalla, y se van pasando días hasta que la Luna esté junto a ella. Se apunta la fecha, o mejor se hace un volcado de pantalla con la fecha visible y se guarda o imprime.

- Luego se pasan más días hasta que vuelva a estar cerca de la estrella, y si es necesario se repite varias veces hasta poder determinar el periodo de la Luna respecto a las estrellas: periodo sidéreo que saldrá 27.3.

También de esta manera puede calcularse el periodo respecto a la posición del Sol, porque Stellarium nos permite ver las posiciones de la luna nueva, que lógicamente coincidirá con la duración de las lunaciones de 29.5 días

Opción C)

Por un método geométrico y algebraico, según se describe en la figura 9.

Datos:

Lunación 29.5 días y traslación de la Tierra: 365.25 días

Velocidad angular de la Tierra: $360^\circ/365.25 = 0.986^\circ$ por día

En los 29.5 días, que dura una lunación:

- La Tierra ha recorrido un ángulo de $29.5 \times 0.986^\circ = 29.076^\circ$
- La Luna habrá dado una vuelta y 29.076° , según la figura:



Si en 29.5 días la Luna ha recorrido un ángulo de 389.076° , Recorrerá los 360° de su traslación alrededor de la Tierra en $29.5 \times 360^\circ / 389.076 = 27.295$ días

Redondeamos a una cifra decimal (que es la precisión que tenía nuestro dato experimental -los 29.5 días-), y queda: **27.3 días**

Fig. 9.

Si se toma el valor de la lunación con más exactitud (29.53 días) también el resultado del periodo de traslación será más exacto (27.32 días), pero a estos niveles no es necesario y además es mejor que utilicen el dato que obtuvieron ellos.

Para seguir practicando este método (la primera vez puede parecer difícil y rebuscado pero si lo repiten verán que es sencillo y reforzará su autoestima) se les puede proponer que calculen la duración de la traslación de la Luna cuando, dentro de miles de millones de años ambos astros se muestren recíprocamente la misma cara, o cuando las lunaciones duraban menos (10 días, 15, 20,... porque sabemos que la Luna estuvo mucho más cerca y los periodos han ido variando).

El movimiento de traslación de la Luna se ha ido ralentizando por el efecto de las mareas: En la Luna se producían mareas sólidas (también ocurre ahora mismo en la Tierra) que ralentizaron su rotación. Para mantener el momento angular del sistema Tierra-Luna nuestro satélite se ha ido alejando, y al aumentar la distancia aumenta su periodo de traslación. Al quedarse mirándonos siempre con la misma cara la causa de las mareas lunares ya no existe, pero continúan las mareas en la Tierra y por ello también nuestro planeta gira cada vez más despacio, la Luna sigue alejándose... y seguirá hasta que también la Tierra le enseñe siempre la misma cara a la Luna, momento en que el proceso concluirá, como ya ha ocurrido en el sistema Plutón-Caronte, que como dos enamorados se miran fijamente el uno al otro sin importarles lo que ocurra fuera.

Se ha calculado que cuando el proceso termine, las lunaciones durarán lo que duran 53 días actuales (porque nuestro día también va cambiando), y por el mismo método que antes (la duración de la traslación terrestre no varía) pueden calcular el periodo de traslación de la Luna. El definitivo, para toda la eternidad, si es que la conversión del Sol en gigante roja no llega hasta aquí y no molesta a la pareja.

5- Ciclos de diferente duración

Debido a que tanto la órbita de la Tierra como la de la Luna son elípticas, y teniendo en cuenta las leyes de Kepler, la situación no es igual en todas las lunaciones: unas son más largas que otras y ello depende tanto de la posición de la Tierra y su cercanía al perihelio o afelio (factor A) como la de la Luna respecto a su perigeo o apogeo (factor B):

En la figura 6 se vio la posición inicial de luna nueva (1), el momento en que se cumple una traslación lunar (en 2) y cuando se completa la lunación (3). Pero las posiciones y los tiempos varían por estos dos factores:

Factor A: El paso de la posición 1 a la 2 (en la figura 10 de 1 a 2') dura siempre 27.3 días, pero el recorrido sería más largo si la Tierra se hubiera movido algo más rápida de la media, como ocurre cuando está cerca del perihelio (actualmente y de manera casual ocurre los primeros días del año).

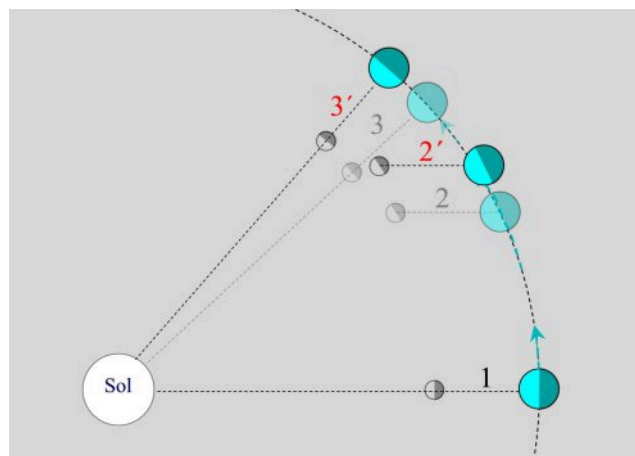


Fig. 10.

También el paso de 2 a 3 (ahora de 2' a 3') (que de promedio son los 2.2 días que faltan hasta los 29.5) durará más en este caso, porque la Luna tiene que recorrer un ángulo ligeramente mayor, con lo que por los dos

factores la duración del ciclo de las lunaciones de 1 a 3 (ahora de 1 a 3') será mayor. En la figura 10 se recoge la situación, con las nuevas posiciones 2' y 3'

Por este motivo, **las lunaciones** que ocurren **con la Tierra próxima al perihelio** (a principio y final de año) **serían más largas** que la media.

Factor B: Por otra parte, y por el mismo motivo, cuando la Luna está cerca del apogeo se mueve más despacio. Aunque en el paso de la posición 1 a la 2 se cumple una órbita y el tiempo total no varía (siempre serán 27.3 días), si en el paso de 2 a 3 (en este caso de 2 a 3'', ver figura 11) la Luna está cerca del apogeo, al ir más despacio necesitará más tiempo para recorrer el ángulo alfa, por ello la Tierra se moverá más, por lo que además se hará más grande ese ángulo (en la figura 11 pasará de 2 a 3'') y la lunación será más larga.

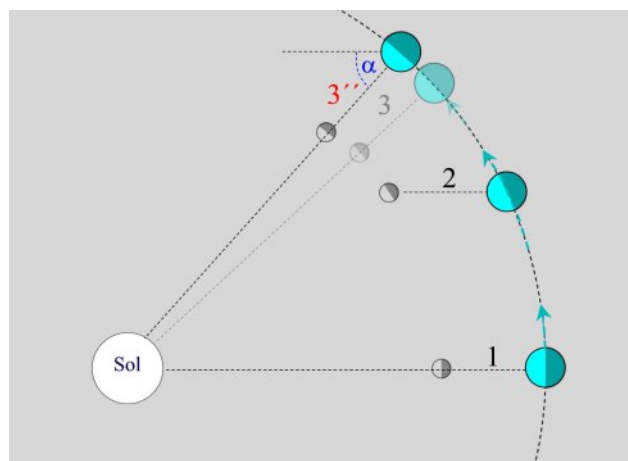


Fig. 11.

Considerando el criterio oficial de la lunación de una luna nueva a la siguiente luna nueva, **si nuestro satélite pasa por el apogeo en el último tramo** (por decirlo de alguna manera, entre el cuarto menguante y la luna nueva) ese paso de 2 a 3 (de 2 a 3'') durará más y **la lunación será más larga**.

Pero curiosamente, esto cambia si considerásemos lunaciones de llena a llena, o empezando por otra fase porque el último tramo (el decisivo) no contendría al apogeo y no duraría más.

Como ejercicio didáctico de la comprobación de la primera causa (Tierra cerca del perihelio-factor A) sería interesante proponer a los chicos que tomen un calendario y comparen la duración de las lunaciones de la mitad del año con las de los extremos. **Pero hay un problema:**

La diferencia de duración en las distintas lunaciones es de solo unas pocas horas, y como en el calendario se redondea al día concreto en que se produce la fase, es muy difícil apreciar esas diferencias.

Habría que proporcionarles los datos del día y la hora del comienzo de las distintas lunaciones, por ejemplo a partir de un listado de efemérides como el de la figura 12. Que ellos calculen las duraciones de estos ciclos, o incluso se las damos ya calculadas si para ellos fuese un trabajo excesivo.

Localidad: PORTUGALETE Longitud: 3.0167° O Latitud: 43.3167° N Altura: 46 m

Inicio Observador Tiempo Efemérides El cielo Datos Herramientas

Fases lunares encontradas

28/01/2017 00:07:02 TU	Luna nueva	29 d 15 h	21/08/2017 18:30:11 TU	Luna nueva	29 d 11 h
26/02/2017 14:58:23 TU	Luna nueva	29 d 12 h	20/09/2017 05:29:53 TU	Luna nueva	29 d 14 h
28/03/2017 02:57:14 TU	Luna nueva	29 d 12 h	19/10/2017 19:12:04 TU	Luna nueva	29 d 16.5 h
26/04/2017 12:16:09 TU	Luna nueva	29 d 7.5 h	18/11/2017 11:42:08 TU	Luna nueva	29 d 19 h
25/05/2017 19:44:28 TU	Luna nueva	29 d 7 h	18/12/2017 06:30:25 TU	Luna nueva	29 d 20 h
24/06/2017 02:30:42 TU	Luna nueva	29 d 7 h	17/01/2018 02:17:15 TU	Luna nueva	29 d 19 h
23/07/2017 09:45:34 TU	Luna nueva	29 d 9 h	16/02/2018 21:05:13 TU	Luna nueva	29 d 16 h
21/08/2017 18:30:11 TU	Luna nueva		17/03/2018 13:11:35 TU	Luna nueva	

Diferencias entre lunas nuevas correlativas, redondeadas a 0.5 horas. Seu0

Valores extremos

Fig. 12.

Pero ¡cuidado! Para darles los datos debemos elegir adecuadamente el año porque el factor del perigeo (el B) puede influir mucho y dar resultados inadecuados, y la posición del

perigeo va girando con los años. Por eso en la figura se ha tomado el 2017 y su continuación, que no es alterado en sentido contrario, apenas en ningún caso, por ese segundo factor B.

También, si queremos hablarles del segundo factor, les podemos proporcionar luego los datos en el mismo año (2017), pero con otra fase (considerando la duración de la lunación por ejemplo de luna llena a llena), ya que como se ha dicho será diferente, como en la figura 13.

icas.dynDNS.org/xpre_fase_lunar_encontradas.htm

Express Facebook

Localidad: PORTUGALETE Longitud: 3.0167° O Latitud: 43.3167° N Altura: 46 m

Observador Tiempo Efemérides El cielo Datos Herramientas

Fases lunares encontradas

12/01/2017 11:33:58 TU	Luna llena	29 d 13 h	07/08/2017 18:10:37 TU	Luna llena	29 d 13 h
11/02/2017 00:32:53 TU	Luna llena	29 d 14.5 h	06/09/2017 07:02:49 TU	Luna llena	29 d 11.5 h
12/03/2017 14:53:47 TU	Luna llena	29 d 15 h	05/10/2017 18:40:07 TU	Luna llena	29 d 10.5 h
11/04/2017 06:08:06 TU	Luna llena	29 d 15.5 h	04/11/2017 05:22:55 TU	Luna llena	29 d 10.5 h
10/05/2017 21:42:30 TU	Luna llena	29 d 15 h	03/12/2017 15:46:58 TU	Luna llena	29 d 11 h
09/06/2017 13:09:36 TU	Luna llena	29 d 15 h	02/01/2018 02:24:05 TU	Luna llena	29 d 11 h
09/07/2017 04:06:34 TU	Luna llena	29 d 14 h	31/01/2018 13:26:44 TU	Luna llena	29 d 11.5 h
07/08/2017 18:10:37 TU	Luna llena		02/02/2018 00:51:21 TU	Luna llena	

Diferencias entre lunas llenas correlativas, redondeadas a 0.5 horas Seuo

Valores extremos

Fig. 13.

Aún haciéndolo así, esto puede tener consecuencias que paradójicamente podrían ser negativas o muy positivas, según se razone luego con ellos.

Una propuesta, que les podría ayudar a entender el proceso del progreso de la ciencia, las teorías con sus avances, aparentes retrocesos, y obtención de la teoría definitiva o más completa podría ser:

Hablarles al principio solo del primer factor (lo del perihelio) porque es el más sencillo de entender, y proporcionarles los datos de la figura 12 y otro día, u otro rato más tarde, los que corresponden al intervalo entre otras fases como se recoge en la figura 13, o bien los datos de la luna nueva en otro año en que el segundo factor interfiera mucho.

Trabajando con el primero les reafirma lo aprendido con las explicaciones de lo del perihelio, y con satisfacción creen haber obtenido la verdad.

Pero a continuación se frustrarán al analizar el segundo.

Se les dice entonces que “hay algo más” y se explica lo de los perigeos, que altera la situación. Se les podría proporcionar también los datos de las posiciones del perigeo tomados de las efemérides y detallar la situación.

Si trabajamos con grupos de enseñanza de niveles más jóvenes, el enfoque podría ser diferente: Explicaríamos solo el primer factor, diciéndoles que como en todo conocimiento científico, puede haber algo más, pero todavía no está a su alcance, y la comprobación podría hacerse solo dándoles como ejemplo las duraciones, ya calculadas, de las lunaciones en 2017.

De todas formas si a algún lector le gusta eso del libro Guinness, que no les lée a los chicos, que puede ser demasiado: Tendría que buscar los records, en las lunaciones de enero o diciembre y precisamente en los años en que el apogeo lunar en esos meses esté entre el cuarto menguante y la luna nueva, porque en ese libro Guinness tan serio solo nos admitirían las lunaciones “oficiales” de luna nueva a luna nueva.

Y como conclusión se puede añadir que aunque parezca paradójico, y tal como puede verse en las dos últimas figuras, las diferencias entre la duración de distintas lunaciones no es demasiado grande, no se separan demasiado de los 29.5 días (como mucho unas 8 horas, un tercio de día), y es mucho menor que la que puede haber de una fase a otra en una misma lunación (por ejemplo del cuarto creciente a la luna llena), donde puede diferir bastante de la

media (que sería 7.38 días = 29.53 días/4 fases), podría ser inferior a 7, con lo que en el calendario a veces de una fase a otra al redondear a fechas concretas incluso hay solo 6 días de diferencia y ¡retrocede en el día de la semana!

Esto es relativamente frecuente, y ocurrió hasta en 4 ocasiones en el año 2019, como se recoge en la figura 14.

Si se quiere montar una discusión didáctica con chicos de cierto nivel, se les proporcionaría un ejemplo de estos.

Los motivos que provocan esta última circunstancia están dados y el lector podría indagar, buscar esa clave en este texto, e incluso calcular con datos del perigeo en las efemérides cuándo debería ocurrir nuevamente.

Pero este artículo quizás ya sea demasiado largo como para seguir analizando en detalle las veleidades de nuestra caprichosa dama de la noche.

2019



Fig. 14.

DIVULGACIÓN DE LA COSMOLOGÍA: ESTUDIO DE UN CASO

Juan Tomé



En este artículo se analizan los contenidos del cuadernillo “El big bang y el origen del universo”, primero de un coleccionable titulado “Los exploradores del espacio”, dirigido a niños, que el diario EL PAÍS distribuye los domingos desde el 7 de febrero de 2021. El cuadernillo relaciona el big bang y la expansión del universo usando ideas, lenguaje y argumentos perfectamente representativos de una forma de abordar esos temas en la divulgación y en la enseñanza secundaria que, aunque muy extendida, es incompatible con la concepción científica estándar. Ese carácter de caso tipo es lo que hace interesante su análisis, porque puede proporcionar herramientas para la crítica de materiales semejantes. El trabajo acaba ofreciendo textos alternativos a los del cuadernillo, para que puedan ser incorporados por profesores y divulgadores en sus explicaciones si lo consideran oportuno.

1 La Portada y el índice inicial



Figura 1: Portada del cuadernillo

La figura 1 es la portada del cuadernillo. Es, claramente, la imagen de la explosión de un objeto material. Cualquiera que la vea pensará que el objeto estaba entero antes de la explosión, que se rompió en fragmentos al explotar y que esos fragmentos son los que se dibujan lanzados en todas direcciones.

El cuadernillo se plantea como un viaje de los dos niños protagonistas, Áurea y Sid, los exploradores del espacio a los que el título se refiere. En un cuadro de la página 1 se anuncian los descubrimientos que esperan a los lectores:

“En este viaje descubrirás:

- *Que el universo es un globo hinchado.*
- *Que no hay nada más rápido que la luz.*
- *Que los astrónomos usan números... astronómicos.*
- *Que todo empezó con una gran explosión.”*

Nos interesan el primero y el cuarto; el segundo y el tercero son complementarios. Lo primero que se descubrirá es “que el universo es un globo hinchado”. Y lo cuarto “que todo empezó con una gran explosión”.

El globo que se va hinchando es una analogía clásica de la divulgación del big bang, probablemente la más repetida, la más querida por los divulgadores. Pero, como toda analogía, tiene limitaciones, y a la vez que ayuda a comprender algunas cosas puede inducir errores sobre otras. Aquí, sin embargo, no hay advertencias ni matices: *el universo es un globo hinchado*. Tampoco los hay sobre el cuarto descubrimiento: *todo empezó con una gran explosión*. La rotunda frase y la imagen de portada se refuerzan. Al avanzar en la lectura del texto se descubrirá que la idea de globo que se hincha y del big bang como explosión se sostienen recíprocamente, y forman parte de un conjunto conceptual coherente.

2 La analogía de la goma del globo que se hincha

El profesor QuAnt1cuS dirige el viaje de los exploradores del espacio. Después de recibir a Áurea y Sid en la nave Atenea, les explica que en la primera etapa viajarán sólo con la imaginación, porque se trata de llegar hasta los orígenes del universo. Les hace saber entonces que “Edwin Hubble ^[1] descubrió que las galaxias que nos rodean se estaban alejando



Figura 2: Ilustración página 14

[1] Es un lugar común afirmar que Edwin Hubble descubrió la expansión del universo, cosa que no debería hacerse sin más explicaciones. Lo que Hubble descubrió fue una relación entre dos magnitudes observables: la distancia a galaxias lejanas y el desplazamiento al rojo de la luz que nos llega de ellas. El descubrimiento de Hubble tiene el enorme valor de ser la primera observación con implicaciones cosmológicas, pero, desde luego, nunca interpretó sus observaciones como debidas a que “las galaxias que nos rodean se alejan unas de otras” ni, mucho menos, que ese alejamiento se debiera al “estiramiento del espacio”, la interpretación actual que la analogía del globo debería ayudar a entender.

unas de otras”, que eso no podía ser resultado del azar y que hay una explicación. “Y si queréis saber cuál es, coged esos globos y empezad a hincharlos.”

“Fijaos en los topes de los globos. [...] ¿Veis cómo se alejan poco a poco unos de otros? No importa en cuáles os fijéis, porque pasa lo mismo con todos. Pues bien, esto exactamente es lo que pasa con el universo.[...] Gracias a innumerables observaciones [...] sabemos que el universo se está hinchando como un globo. O, para ser más precisos, que se está expandiendo. Cada segundo que pasa se vuelve más grande y los objetos que contiene, como las galaxias, se alejan cada vez más entre sí.”

Uno de los principales cuidados que se deben tener cuando se usan analogías para explicar propiedades del universo es precisar muy bien qué cosa es la que representa al universo en la analogía. En el caso del globo, lo que representa al universo es, estrictamente, la goma del globo. Ni el exterior ni el interior del globo, ni el aire contenido, representan nada en la analogía. Hay que prescindir, mentalmente, de ellos y pensar solo en la goma si se quiere entender lo que la analogía quiere enseñar. La analogía no debería llamarse “analogía del globo” sino “analogía de la goma del globo”. A continuación, se explica razonadamente por qué “pensar en el globo” es muy distinto de “pensar en la goma del globo”:

1. El globo se hincha, se hace más grande, mientras que la goma se estira, que es lo que se quiere enseñar. El hincharse del globo, el hacerse más grande, supone ocupación del espacio externo, un hecho que se refiere al globo y a su exterior. En cambio, el estirarse de la goma no necesita referirse a nada más, es una propiedad interna de la goma, una propiedad interna del universo representado. Si se piensa en la expansión del universo como el cambio de tamaño del globo que se hincha, es muy fácil caer en el error de pensar que el universo, el globo tridimensional, se hace más grande en un espacio tridimensional preexistente, el espacio alrededor del globo.

2. Uno de los puntos fuertes de la analogía de la goma del globo es que sirve para dejar muy claro que las galaxias no se mueven a través del espacio sino que están fijas y se separan arrastradas por él. Cuando se piensa en la expansión como aumento de volumen del globo, esa utilidad del modelo se pierde, porque a medida que el globo se hincha cada una de las galaxias se va separando del centro, alejándose de él siguiendo una trayectoria radial. La figura 3 explica eso muy bien. Arriba, las coordenadas espaciales son externas al globo y las galaxias se mueven respecto de ellas hacia fuera. Abajo, las coordenadas son de la goma del globo, internas, y las galaxias no se mueven respecto de ellas, sino que se mantienen en el mismo sitio del “espacio goma”. Si se separan es porque el espacio se estira y el retículo de coordenadas, en consecuencia, aumenta su escala.

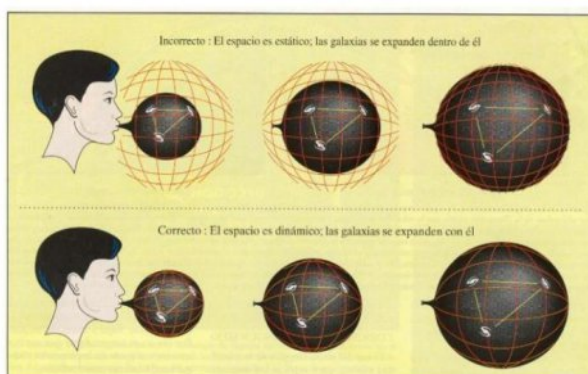


Figura 3. Odenwald y Tresch, Sky, Tribuna de Astronomía

3. El globo es un objeto tridimensional, una esfera, mientras que la goma del globo es un objeto bidimensional, la superficie de una esfera. El globo es un objeto finito que tiene límite, su superficie externa. Moviéndose dentro del globo se llega a la superficie que corta el paso, que separa lo que es globo de lo que no lo es. La goma, en cambio, es un objeto finito sin límites. Moviéndose por la goma (seres como sellos o calcomanías son los que harían esos viajes) nunca se llega a ningún punto en el que no se pueda seguir avanzando en la misma dirección. El globo representa un universo tridimensional finito y limitado, con frontera. La goma representa un universo bidimensional finito pero ilimitado, sin frontera.

A la vista de todas esas razones, queda claro que la descripción de la expansión del profesor QuAnt1cuS:

"[...] sabemos que el universo se está hinchando como un globo. [...] Cada segundo que pasa se vuelve más grande y los objetos que contiene, como las galaxias se alejan cada vez más entre sí."

no ayuda a entender correctamente la expansión. Por otra parte, su descripción conduce a la idea de big bang como explosión de algo, como se ve en el siguiente epígrafe.

3 "Rebobinar la película" o "Dar marcha atrás al tiempo"

Además de Áurea y Sid, los niños, y del profesor QuAnt1cuS, el robot Marcelino completa la tripulación de la nave de los exploradores del espacio. Después de explicar a los niños la expansión mediante el globo que se hincha, el profesor QuAnt1cuS pide a Marcelino que se transforme en proyector y les dice:

"-Imaginad que estamos viendo una película sobre el universo. Gracias al Hubble y otras observaciones, sabemos que con el paso del tiempo el universo se hace cada vez más grande, las distancias aumentan y los objetos se alejan unos de otros."

-¿Podéis imaginar cómo era el universo hace, digamos, mil millones de años?

-Bueno, era más pequeño, las distancias eran menores y los objetos estaban más cerca unos de otros ... -respondió Sid. La pregunta parecía tan sencilla que debía tener alguna trampa.

-Exacto. Ahora rebobinemos un poco nuestra película hasta llegar al principio. Marcelino, por favor, ¿serías tan amable?



La esfera del universo empezó a hacerse más pequeña, como un globo que se desinfla, cada vez más pequeña, más pequeña, más pequeña... ¡hasta que desapareció!

-Parece difícil de creer, pero hace billones de años todo lo que había en el cosmos estaba concentrado en el mismo lugar: las estrellas, los planetas, los cometas, los asteroides..., todo estaba en un punto infinitamente pequeño, mucho más diminuto que la cabeza de un alfiler."

Al rebobinar la película, al dar marcha atrás al tiempo para llegar al principio, el error inicial de la analogía (considerar que el universo es el globo, que es una esfera), conduce a las conclusiones erróneas típicas de muchos trabajos de divulgación de la cosmología del big bang: decir que, al principio, “todo estaba en el mismo lugar”, “todo estaba en un punto”. El camino que conduce a esos errores está claro: si una esfera se hace cada vez pequeña llega a ser un punto en su centro. Pero el argumento es falso. Porque el universo no es una esfera, ni en la realidad ni en la analogía; y porque la expansión no es aumento de tamaño y rebobinarla no es empequeñecimiento.

La analogía de la goma del globo, bien entendida y bien empleada, puede evitar esos errores. Basta hacer ver que la expansión entendida como estiramiento conduce a la disminución de la densidad de la goma del globo, que se va haciendo más fina, más transparente a medida que se estira. Rebobinar el estiramiento significaría aumento de la densidad de la goma, sin referencia alguna a tamaño. Cuando se ignora todo lo que no es goma, a nada se puede referir el “tamaño” de la goma, con nada se puede comparar para decir si se hace más grande o más pequeña, de forma que hablar de tamaño es un sinsentido. Más y más “atrás en el tiempo” sólo se encontrará más y más densidad, y eso de todo el universo, no de un punto. En el caso de la goma del globo, que representa un universo finito, más y más “atrás en el tiempo” se encontrará un universo finito más denso de lo que se pueda imaginar. Pero si la analogía se planteara con una lámina de goma infinita, más y más “atrás en el tiempo” se encontrará un universo infinito más denso de lo que se pueda imaginar. De punto inicial, nada. La singularidad inicial de los modelos big bang viene definida por los valores infinitamente grandes de la densidad y de la temperatura, no por el tamaño. De hecho, si como parecen indicar los indicios observacionales, nuestro universo es infinito, entonces también será infinita la singularidad big bang. Singularidad no puede confundirse con punto.

La tentación de “rebobinar la película” cuando se usa el globo como modelo del universo es muy grande. Cuando se tiene el globo ya hinchado en las manos, después de haberlo ido inflando poco a poco, es muy difícil resistirse a dejar que se desinfla lentamente mientras se sugiere que se está viendo en directo la evolución del universo marcha atrás. Es muy difícil porque el éxito, incluso el ¡oooh!, está asegurado muchas veces [2]. Pero hay que resistirse. O, en todo caso, aprovechar la situación para señalar las contradicciones que se derivan de considerar el globo, en vez de la goma del globo, como modelo del universo.

[2] Hay que reconocer que ver películas al revés tiene algo profundo que lo hace fascinante. Si la película es la del universo entero deja a muchos con la boca abierta. Llamo “efecto El Hormiguero” a la necesidad de divulgadores y profesores de ciencia de incluir la espectacularidad en sus intervenciones tan a menudo como sea posible. A veces el “efecto El Hormiguero” es bienvenido; otras veces hay que renunciar a él.

4 “Todo empezó con una gran explosión”



Figura 5: Imagen páginas 17-18

La conclusión errónea alcanzada al rebobinar la película de la expansión, deja servida en bandeja la descripción del big bang como explosión. Después de decir a los niños que “todo estaba en un punto infinitamente pequeño, mucho más diminuto que la cabeza de un alfiler”, en la página siguiente del cuadernillo, acompañando a la imagen de la figura 5, la misma que la de portada pero a doble página, el profesor QuAnt1cuS les dice:

*“Hace mucho tiempo se produjo algo similar a una gran explosión. Y de aquel punto infinitesimal empezó a surgir una gran cantidad de energía y materia, toda la energía y materia que el universo contiene hoy. Fue lo que llamamos **big bang**. Y justo después del big bang, toda aquella materia y energía empezó a expandirse en todas direcciones, creando así el tiempo y el espacio. Al principio no había nada, y después apareció un maravilloso universo lleno de objetos.”*

En ese párrafo, el big bang se presenta como un fenómeno similar a una gran explosión, una surgencia de materia y energía que empezó a expandirse en todas direcciones. Está fuera de duda que quien lo lea mientras mira la ilustración que lo acompaña guardará en su cabeza, y a buen recaudo, a prueba de intentos de sustituirla por otra, la idea de big bang como explosión de algo. Ahora bien, ¿es el big bang similar a la explosión de algo? Para responder, consideremos lo que la idea de explosión de algo supone, lo que la palabra explosión evoca. Es lo siguiente:

- a. Hay algo material que preexiste a la explosión. Una bombona de butano, un cohete de feria, una carga de fuegos artificiales, un petardo, una granada, una bomba; todos esos objetos existen antes de explotar.
- b. La explosión sucede en algún lugar concreto de un espacio. El lugar es el que ocupa la materia que explota; el espacio es el que se extiende en torno suyo.
- c. La explosión produce fragmentos, que salen despedidos, lanzados, impulsados, en todas direcciones, que se mueven a través del espacio en el que estaba la cosa que explotó.
- d. Los fragmentos de la explosión se mueven a diferentes velocidades: los que salen lanzados más deprisa siempre van por delante de los más lentos, en todo momento habrán llegado más lejos que los más lentos.
- e. La explosión puede ser vista “desde fuera”, desde un lugar seguro alejado del que ocupaba la cosa que explotó.
- f. La explosión es un proceso de muy corta duración.

Pues bien, de todas esas cualidades de las explosiones, solo la de ser un proceso de muy corta duración conviene al big bang. El resto no le cuadra de ninguna manera. La cosmología del big bang no supone nada anterior a la explosión, ni considera espacio vacío preexistente alrededor de lo que se piense que explota, ni hay fragmentos que salen despedidos a diferentes velocidades, ni es posible ninguna observación “desde fuera”. A pesar de su nombre, la cosmología del Big bang no tiene nada que ver con la idea de explosión.

5. La familia de ideas “el big bang fue una gran explosión”

La coherencia interna es una propiedad de cualquier sistema de ideas que pretenda serlo, y eso con independencia de que el sistema pueda ser correcto o no. El grado de coherencia de un sistema podrá ser mayor o menor, pero las contradicciones internas hacen a cualquier sistema insostenible. Pues bien, la idea de que “el big bang fue una gran explosión”, más que una idea aislada, es un conjunto, una familia de ideas bien relacionadas consistentes entre sí. Veamos algunos aspectos concretos de la coherencia de esa familia:

1 Los universos de la familia “el big bang fue una gran explosión” tienen un punto singular.

Si el universo se imagina como una esfera, su centro es un punto singular: ninguno de los demás puntos tiene sus propiedades, en particular su simetría. Si se usa un globo para representar la expansión de ese universo, su centro es singular. Es el centro de la expansión, el punto del que se alejan todas las galaxias al hinchar el globo. Y “dando marcha atrás al tiempo” es el punto en que todas las galaxias convergen, el punto singular inicial, el lugar donde acontece el big bang, la gran explosión.

2 Los universos de la familia “el big bang fue una gran explosión” tienen frontera.

La frontera de los universos originados en una “gran explosión” está marcada por los objetos que salieron despedidos a mayor velocidad, los que van por delante de los demás. En la analogía del globo, la frontera es la goma del globo y las galaxias fijadas a la goma son las de avanzadilla. La goma del globo separa el interior, la “esfera universo”, del exterior, el “no universo” [3].

3 En los universos de la familia “el big bang fue una gran explosión” las galaxias se mueven radialmente.

La gran explosión lanza fragmentos en todas las direcciones radiales posibles a partir del punto singular donde la explosión ocurre. En consistencia con ello, cuando el universo se representa por un globo, el movimiento de las galaxias al hincharse el globo es radial, alejándose del centro del globo. Más evidente es ese movimiento radial cuando se “da marcha atrás al tiempo” y se desinfla el globo, porque ahora todo sucede más rápido que al hincharlo y el movimiento de las galaxias, ahora acercándose al centro, es más notorio.

[3] Podría pensarse que la gran explosión ocurre en un espacio vacío preexistente y que, por lo tanto, las galaxias de avanzadilla no marcan ninguna frontera, que tanto el interior como el exterior del globo son partes de ese espacio. Pero, en tal caso, la gran explosión no sería el origen del universo, sino, tan solo, una explosión local en algún lugar del universo vacío preexistente; y el globo no sería todo el universo, sino solo la parte donde la explosión se produjo: el universo sería entonces la habitación y todo el espacio tridimensional.

Queda claro que la incoherencia no es el problema de la familia de ideas “el big bang fue una gran explosión”. El problema es que no cumple el Principio Cosmológico de Homogeneidad, incompatible con la existencia de puntos singulares; que no cumple con la condición de no fronteras que la cosmología científica impone a cualquier modelo de universo para evitar contradicciones internas; y que no se ajusta a la idea científica de expansión, que se entiende como estiramiento del espacio que arrastra galaxias fijas embebidas en él.

La familia de ideas “el big bang fue una gran explosión” tiene más miembros que los que se han citado aquí. El siguiente cuadro los lista todos, los que han aparecido en el texto analizado y los que no. En paralelo, se listan los miembros de la familia alternativa que corresponde a la concepción científica de los modelos big bang.

Los miembros de la familia de ideas “el big bang fue una gran explosión”	Los miembros de la familia alternativa acorde con los modelos científicos big bang
1 El big bang fue una gran explosión que originó el universo. 2 El universo tiene fronteras, como una esfera, como un globo. 3 La expansión se entiende y se describe como aumento de tamaño. 4 Las galaxias se mueven radialmente a través del espacio, a partir del punto de explosión. 5 El desplazamiento al rojo cosmológico es debido al efecto Doppler. 6 La ley de Hubble es una relación entre velocidades de galaxias y distancia. 7 La relación entre rapidez del incremento de distancias y las distancias se identifica con la ley de Hubble.	1 El big bang es la fase explosiva inicial del proceso universo. 2 El universo no tiene fronteras, como la superficie esférica, como la goma de un globo. 3 La expansión se entiende y se describe como estiramiento del espacio. 4 Las galaxias están en reposo en el espacio, fijas en la red de coordenadas universales. 5 El desplazamiento al rojo cosmológico es debido al estiramiento de fotones. 6 La ley de Hubble es una relación entre desplazamiento al rojo y distancias. 7 La relación entre rapidez del incremento de distancias y las distancias es distinta de la ley de Hubble.

6 Textos alternativos

La familia de ideas “el big bang fue una gran explosión” está muy extendida en la divulgación de la cosmología. Quizás alguien piense que las ideas de esa familia son más sencillas que las correctas, y que por eso son más apropiadas para niños. Pero no es nada fácil imaginar la explosión de un universo entero, ni que “todo estaba en un punto infinitamente pequeño”, ni entender qué quiere decir que “de aquel punto infinitesimal empezó a surgir [...] toda la energía y materia que el universo contiene hoy”, ni cómo al expandirse toda esa energía y materia iba “creando el tiempo y el espacio”, ni concebir que “la esfera del universo empezó a hacerse más pequeña [...] hasta desaparecer”. Repetidas muchas veces, y oídas muchas veces también, todas esas frases comienzan a hacerse familiares, para los niños y para los divulgadores. Pero, sin el aval de la repetición, no son ni más sencillas ni más comprensibles que sus equivalentes correctas.

Para finalizar este trabajo, se presentan en la columna izquierda de la tabla siguiente los textos del cuadernillo “El big bang y el origen del universo” que se han analizado. En la columna derecha, para facilitar la comparación, se presentan los alternativos, manteniendo tanto como ha sido posible su lenguaje, su composición y su extensión.

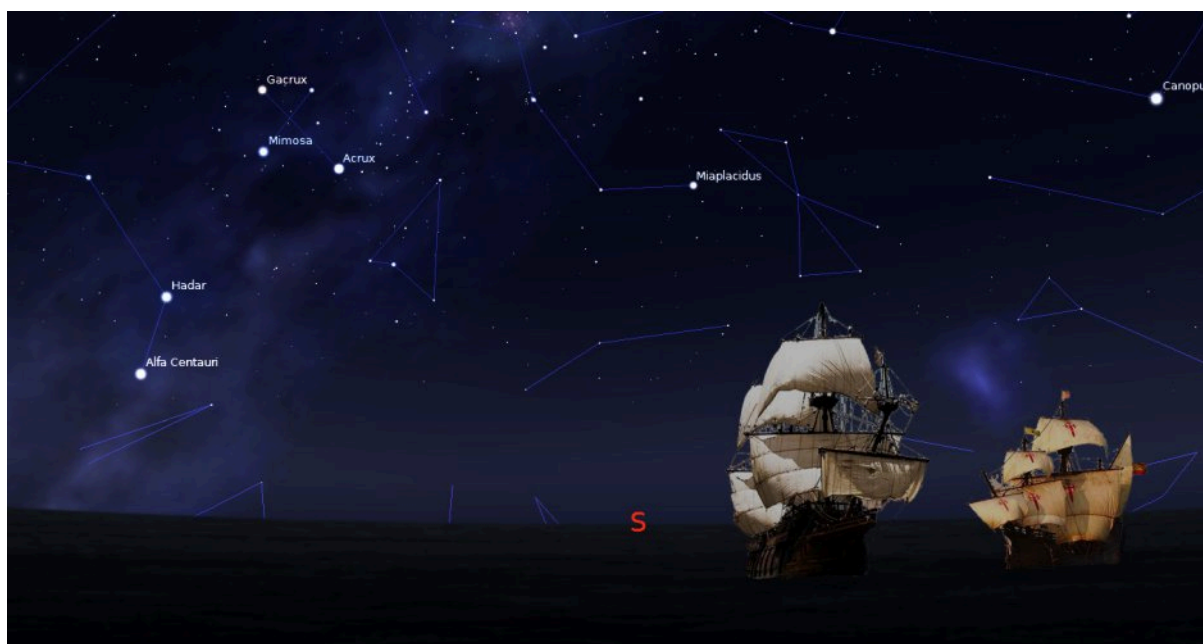
Textos del cuadernillo analizado	Textos alternativos
“En este viaje descubrirás: • Que el universo es un globo hinchado. • Que no hay nada más rápido que la luz. • Que los astrónomos usan números... astronómicos. • Que todo empezó con una gran explosión.”	En este viaje descubrirás: • Que el universo es como la goma de un globo que se va estirando. • Que no hay nada más rápido que la luz. • Que los astrónomos usan números... astronómicos. • Que las fases iniciales del universo fueron explosivas.
“Fijaos en los topos de los globos. [...] ¿Veis cómo se alejan poco a poco unos de otros? No importa en cuáles os fijéis, porque pasa lo mismo con todos. Pues bien, esto exactamente es lo que pasa con el universo. [...] Gracias a innumerables observaciones [...] sabemos que el universo se está hinchando como un globo. O, para ser más precisos, que se está expandiendo. Cada segundo que pasa se vuelve más grande y los objetos que contiene, como las galaxias se alejan cada vez más entre sí.”	Gracias a innumerables observaciones [...] sabemos que el universo se está estirando como la goma de un globo. Se dice que se está expandiendo. Cada segundo que pasa el espacio se estira más y los objetos que contiene, como las galaxias, se separan cada vez más entre sí. Fijaos en los topos de los globos. Ninguno cambia de sitio, ninguno se mueve por la goma de acá para allá. Y sin embargo, ¿veis cómo se separan poco a poco unos de otros? No importa, además, en cuáles os fijéis, porque pasa lo mismo con todos. Pues lo mismo pasa con las galaxias en el universo: se separan pero no se mueven; se separan, tan sólo, porque el espacio se estira.

Textos del cuadernillo analizado	Textos alternativos
“-Imaginad que estamos viendo una película sobre el universo. Gracias al Hubble y otras observaciones, sabemos que con el paso del tiempo el universo se hace cada vez más grande, las distancias aumentan y los objetos se alejan unos de otros. -¿Podéis imaginar cómo era el universo hace, digamos, mil millones de años? -Bueno, era más pequeño, las distancias eran menores y los objetos estaban más cerca unos de otros ... -respondió Sid. La pregunta parecía tan sencilla que debía tener alguna trampa. -Exacto. Ahora rebobinemos un poco nuestra película hasta llegar al principio. Marcelino, por favor, ¿serías tan amable? La esfera del universo empezó a hacerse más pequeña, como un globo que se desinfla, cada vez más pequeña, más pequeña, más pequeña... ¡hasta que desapareció! -Parece difícil de creer, pero hace billones de años todo lo que había en el cosmos estaba concentrado en el mismo lugar: las estrellas, los planetas, los cometas, los asteroides..., todo estaba en un punto infinitamente pequeño, mucho más diminuto que la cabeza de un alfiler.”	-Imaginad que estamos viendo una película sobre el universo. Gracias al Hubble y otras observaciones, sabemos que el espacio se estira, las distancias aumentan y los objetos se separan unos de otros. -¿Podéis imaginar cómo era el universo hace, digamos, mil millones de años? -Bueno, las distancias eran menores, los objetos estaban más cerca unos de otros y la goma estaría menos estirada... -respondió Sid. La pregunta parecía tan sencilla que tenía que tener alguna trampa. -Exacto. Ahora rebobinemos un poco nuestra película. Marcelino, por favor, ¿serías tan amable? La goma del globo empezó a encogerse más y más, a volverse cada vez más apretada, más densa, hasta que quedó como estaba antes de estirla. -Parece difícil de creer, pero hace billones de años el universo era inconcebiblemente más denso que ahora. Un trozo de universo de aquella época que fuera como una cabeza de alfiler tendría tanta masa como todo el sistema solar junto y mucho más. Si el universo es infinito, como dicen nuestras observaciones, sería infinito también entonces y así de denso por todas partes.
“Hace mucho tiempo se produjo algo similar a una gran explosión. Y de aquel punto infinitesimal empezó a surgir una gran cantidad de energía y materia, toda la energía y materia que el universo contiene hoy. Fue lo que llamamos big bang. Y justo después del big bang, toda aquella materia y energía empezó a expandirse en todas direcciones, creando así el tiempo y el espacio. Al principio no había nada, y después apareció un maravilloso universo lleno de objetos.	El universo ha sido, y todavía será, un proceso muy largo. Las fases iniciales, muy densas, de presiones muy altas y muy calientes, fueron explosivas. Por eso las llamamos fases big bang. El espacio empezó a estirarse muy deprisa y el universo se fue enfriando. Cuando la temperatura bajó lo suficiente pudieron formarse, y durar, las maravillosas estructuras que ahora vemos, vivos como nosotros incluidos, imposibles en aquellas primeras fases tan inhóspitas.

Corresponde ahora a los lectores decidir qué textos dejan a los niños (y a sus padres, muy probables lectores del cuadernillo) en mejores condiciones de ampliar y afianzar su conocimiento y su comprensión de la cosmología del big bang.

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS CIELOS DEL HEMISFERIO SUR

Juan Carlos Terradillos



Américo Vespuccio^[1] fue el primer explorador europeo que dejó una descripción de una constelación del Hemisferio Sur. Se trataba de la Cruz del Sur, y sucedió durante su segundo viaje (1499-1500), por los mares de la costa norte suramericana. La expedición era capitaneada por Alonso de Ojeda, y también viajaba el gran cartógrafo español Juan de la Cosa, que fue el primero en dibujar una mapa del Nuevo Mundo en el año de 1500. En este artículo repasamos algunas anotaciones que hicieron esos pioneros.

"Porque yo observé cuatro estrellas formando como una almendra, que tenían poco movimiento, y si Dios me da vida y salud, espero volver pronto a aquel hemisferio, y no regresar sin señalar el polo" (A. Vespuccio, segundo viaje).

Pero fue Andrea Corsali ^[2], en su viaje a la India en el año 1515, el que dejó constancia, en una de sus cartas a Lorenzo II de Médici, de su forma y disposición en el cielo austral mediante un dibujo (Fig. 1).

^[3] Américo Vespuccio (1454-1512), comerciante, explorador y cosmógrafo florentino que, al servicio de las coronas de Castilla y Portugal, participó en cuatro viajes de exploración de las costas suramericanas, llegando durante su tercer viaje hasta la Patagonia. Fue nombrado en 1508 piloto mayor de la Casa de Contratación de Sevilla, y en 1507 el cartógrafo M. Waldseemüller dió su nombre al nuevo continente descubierto.

^[2] Andrea Corsali (1487- ?) , explorador italiano que, a bordo de una nave portuguesa viajó a la India, dejando el relato escrito de lo visto durante el mismo en dos cartas que envió a sus protectores de la casa de Medici y que fueron publicadas en Florencia en 1518.

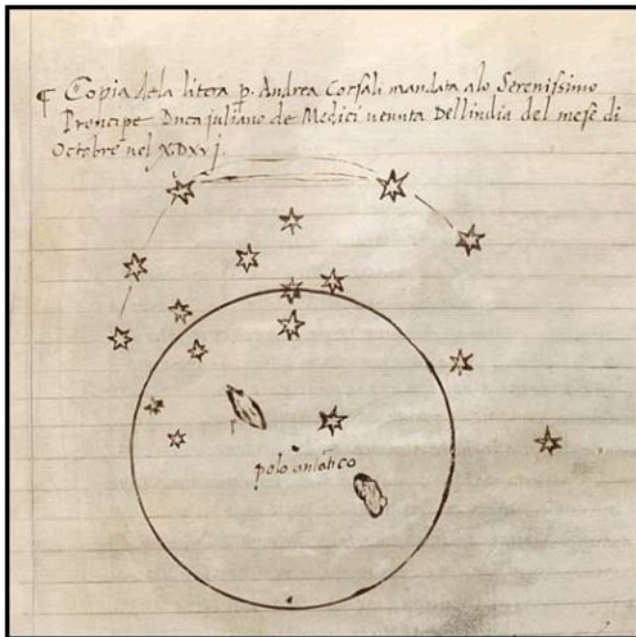


Fig. 1. Dibujo de Andrea Coralli

Desde siempre su visión ha dado lugar a numerosas historias y leyendas que la vinculaban con algunos pueblos y culturas del Cono Suramericano y de Oceanía. Esta relación ha dado lugar a que varios de los países de esta zona de la Tierra tengan representada, de una forma u otra, a la Cruz del Sur en sus banderas nacionales; como es el caso de Australia, Brasil, Papúa-Nueva Guinea y Nueva Zelanda.



Fig. 2. La Cruz del Sur en las banderas de Australia, Brasil, Papúa-Nueva Guinea y Nueva Zelanda.

En España, y Europa en general, es una constelación que hoy en día no es visible, lo cual no quiere decir que no lo haya sido en otras épocas del pasado, como sucedía en el Neolítico y posterior Calcolítico. Su asterismo y la magnitud de las cinco estrellas principales que la

conforman no pasan desapercibidas para un observador nocturno, como me ocurrió a mí una noche del invierno austral, cuando la pude distinguir en el Valle del Colca (Perú), a 3.500 m. de altura, perdida entre miríadas de estrellas que se extendían como un continuo sobre la bóveda celeste.

El objetivo que persigue el presente artículo es hacer una relación histórica de cómo los marinos, fundamentalmente europeos, que navegaban por los Mares del Sur durante la época de los grandes descubrimientos geográficos, y posteriormente algunos eminentes astrónomos, fueron confeccionando las cartas estelares de estos cielos hasta su configuración definitiva formulada por la Unión Astronómica Internacional en 1922.

Ya que esta elaboración cartográfica del cielo fue un proceso continuo que se remonta desde la Antigüedad hasta el siglo XX, es necesario establecer una serie de fases que posibilitaron su realización.

El legado del mundo clásico

Si se define el Hemisferio Sur celeste como la parte de la bóveda que queda por debajo del Ecuador celeste, entonces hay que decir que muchas de las estrellas ya conocidas desde la Antigüedad eran de este hemisferio. Así figuraban ya en el catálogo de estrellas de la Astronomía clásica que fue elaborado por Ptolomeo, en su obra del Almagesto. Como ejemplos se pueden poner las constelaciones del Can Mayor, Centauro y la Cruz del Sur, totalmente australes, con estrellas de gran magnitud visual, que entonces, en el siglo II D.C., eran plenamente visibles en el mundo mediterráneo. En ese tratado astronómico se da un completo catálogo estelar, muy valioso por tener detrás la mano de otro enorme astrónomo del mundo antiguo, Hiparco de Nicea (s. II A.C.). Con el paso del tiempo, por efecto de la precesión de los equinoccios, algunas de esas constelaciones dejaron de ser visibles en las latitudes medias del norte, y su recuerdo se perdió, como le sucedió a la Cruz del Sur.



Fig. 3. Constelación de Centauro, en la traducción del Almagesto que hizo Abd-al-Rahman Al Sufi (s.X).

Este legado fue transmitido después a todo el occidente europeo a través de los grandes astrónomos árabes, traduciéndose la obra de Ptolomeo, como hizo Abd-al-Rahman Al Sufi (s. X), el cual menciona ya la Gran Nube de Magallanes, como Al Bakr (Buey Blanco), y otras constelaciones australes como pueden ser las constelaciones del Centauro y el Lobo.

La época de los grandes descubrimientos geográficos.

Fueron las dos grandes monarquías ibéricas, Castilla y Portugal, las que ampliaron el Mundo conocido hasta entonces, con el descubrimiento del continente americano y el establecimiento de la ruta comercial hacia la India y las islas de las Especies.

Sus marinos empezaron a surcar mares por los que nunca antes habían navegado, y a observar cielos nunca antes vistos. Esto les desconcertaba y les infundía temor, pues no podían navegar apoyándose en constelaciones de estrellas conocidas, referencias fundamentales para establecer su posición, como por ejemplo, la altura de la Estrella Polar, para conocer la latitud.

Los textos que a continuación aparecen dan fe de este sentimiento de estar un poco perdidos en el vasto Océano.

Antonio Pigafetta^[3]:

"Pasado que hubimos la línea equinoccial, hacia el mediodía, se perdió la referencia de la estrella Polar; y, así, navegose con rumbo Sur-Suroeste hasta una tierra que se llama la tierra del Verzín, en los 23 grados y medio del Polo Antártico".

Américo Vespucio:

"Y tanto navegamos por la zona tórrida hacia la parte del austro, que nos encontramos bajo la línea equinoccial, y teniendo un polo y el otro al final de nuestro horizonte, y la pasamos por seis grados perdiendo totalmente la estrella tramontana; que apenas se nos mostraban las estrellas de la Osa Menor, o por mejor decir, las guardias que giran alrededor del Firmamento: y deseoso de ser yo el autor que señalara la estrella del Firmamento del otro polo, para señalar cuántas de ellas tuviesen menor órbita y se hallasen más cerca del Firmamento, y no pude con tantas malas noches que pasé, y con cuantos instrumentos usé, que fueron el cuadrante y el astrolabio. No advertí estrella, que tuviese

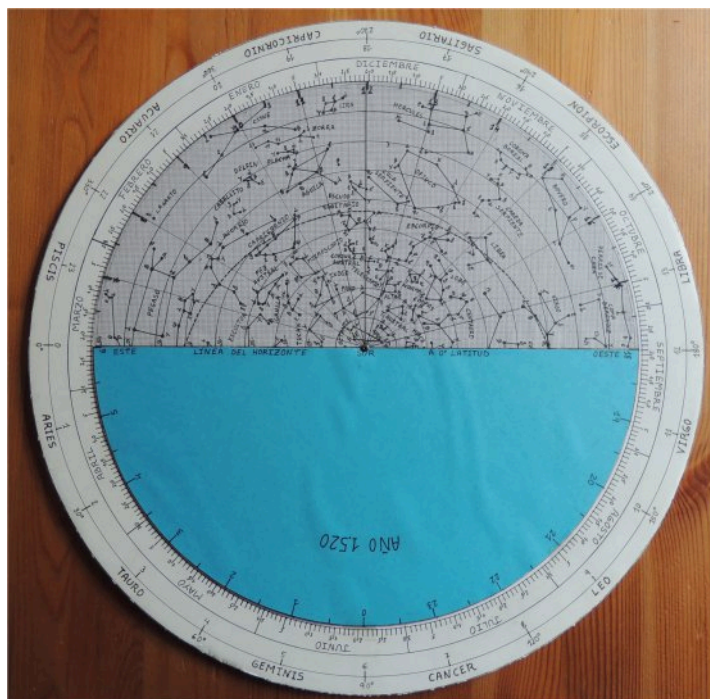


Fig. 4. Planisferio del Hemisferio Sur, para el años 1520, realizado por el autor.

^[3] Antonio Pigafetta (1480-1534), veneciano que se enroló en la expedición de Magallanes que culminaría con la primera circunnavegación a la Tierra. Al ser uno de los dieciocho hombres que, junto a Elcano, llegaron a Sanlúcar de Barrameda el 6 de septiembre de 1522, se convirtió en el cronista oficial del mismo. Su relato fue publicado en Venecia en 1536.

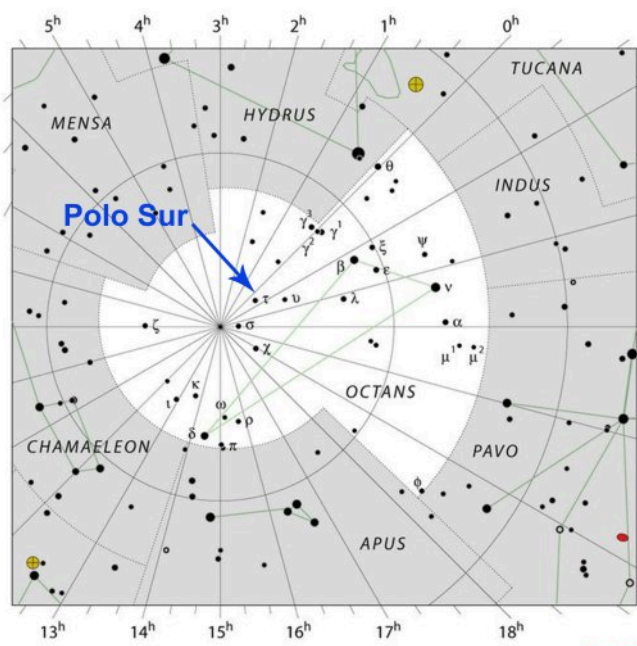


Fig. 5. Posición del Polo Sur en el s.XVI.

menos de diez grados de movimiento sobre su órbita, de modo que no quedé satisfecho conmigo mismo de nombrar ninguna que señalase el polo sur a causa del gran círculo que hacían alrededor del Firmamento" (A. Vespuccio, segundo viaje).

En la Figura 4 se puede ver un planisferio celeste realizado por mí, con las estrellas del Hemisferio Sur de la época de nuestros protagonistas (1520), para la latitud de 0°, nuestro Ecuador (la línea equinoccial de Vespuccio). En la Figura 5 se muestra dónde se localizaba el Polo Sur entonces.

Este temor a perder de vista la Polar, que Pigafetta menciona al llegar a las costas de Brasil, no era compartido por Vespuccio, que estaba más acostumbrado a navegar por latitudes del Hemisferio Sur, no en vano trabajó tanto al servicio de la corona portuguesa como de la española; y desarrolló una actividad más experimental en la búsqueda de la "estrella del Firmamento del otro Polo".

Todos los marinos que navegaban por el Hemisferio Sur se quedaban sorprendidos por la

Cruz del Sur, dadas sus magnitudes visuales y su disposición en el cielo en forma de cruz o de almendra, como dice Vespuccio. Todos son conscientes de su relación con el camino que señala la dirección del Polo Sur, pero también de que no funcionan como la Polar en el norte. Hay que hacer otras mediciones o esperar el momento oportuno de la noche para medir la altura del Polo Sur, como bien apunta el padre José Acosta ^[4].

"Bien es verdad que el Crucero de acá es hermoso y de vista admirable. Crucero llamamos cuatro estrellas notables que hacen entre sí forma de cruz, puestas en mucha igualdad y proporción. Creen los ignorantes que este Crucero es el polo del Sur, porque ven a los marineros tomar altura por el Crucero de acá, como allá suelen por el Norte, más engañanse. Y la razón porque lo hacen así los marineros es porque no hay de esta banda estrella fija que muestre al polo al modo que allá la Estrella del Norte lo hace, y así toman el altura por la estrella que es el pie del Crucero, la cual estrella dista del verdadero y fijo polo, treinta grados como la Estrella del Norte allá dista tres y algo más; y así es más difícil de tomar acá el altura porque la dicha estrella del pie del Crucero ha de estar derecha, lo cual es solamente a un tiempo de la

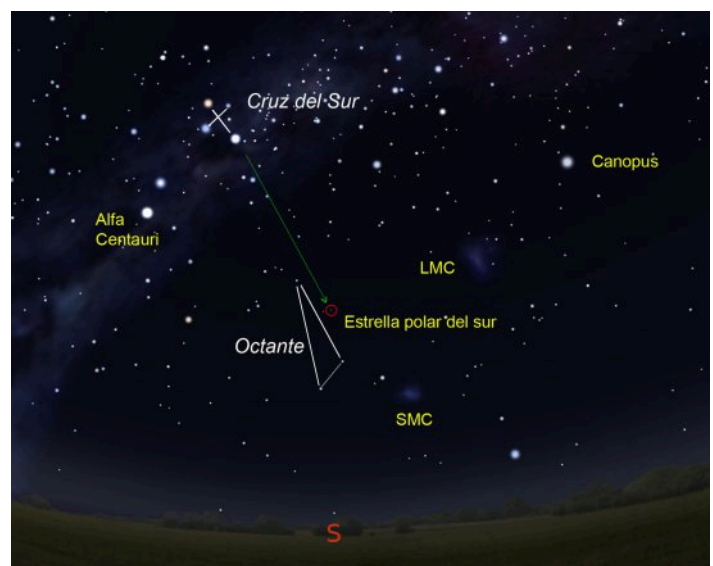


Fig. 6. Relación de la Cruz del Sur con el Polo.

^[4] José de Acosta (1540-1600), jesuita que al servicio de la Compañía de Jesús viajó por los territorios de Perú y México, dejando constancia de sus observaciones en el magnífico documento etnográfico que es su libro "Historia natural y moral de las Indias", publicado en Sevilla en el año 1590.

noche, que en diversas partes del año es a diferentes horas, y en mucho tiempo del año en toda la noche no llega a encumbrar, que es cosa disgustosa para tomar el altura. Y así los más diestros pilotos no se curan del Crucero, sino por el astrolabio toman el sol y ven en él el altura en que se hallan. En lo cual se aventajan comúnmente los portugueses, como gente que tienen más curso de navegar de cuantas naciones hayen el mundo".

Es por tanto el padre Acosta el que nos da una visión más realista de la función que puede cumplir este "Crucero" del Sur y de sus limitaciones para usarlo en la navegación astronómica de la época.

Esta constelación, como el resto de las circumpolares australes, tiene un movimiento diario y también anual alrededor del Polo Sur en sentido de las agujas del reloj, contrario pues a las circumpolares boreales del norte.

Esta disposición estelar no pasó desapercibida para ningún navegante en los mares del sur, ya que la prolongación de las dos estrellas que forman su lado más largo (γ , α) nos llevan hacia la región del Polo Sur, como se puede ver en la foto de al lado. Además, a principios del S XVI, las coordenadas ecuatoriales de estas "Guardas" para el Sur, ayudaban más que hoy en su localización. Hoy hay que prolongar un número de veces esta distancia (4,5 veces) y ayudarse un poco con las estrellas α y β del Centauro para localizarlo.

Otro de los problemas añadidos al navegar por el Hemisferio Sur era que, al ir bajando en latitud, las ventanas de visibilidad del horizonte cambiaban, apareciendo paulatinamente estrellas y agrupaciones de ellas que antes no eran visibles y perdiendo de vista otras con las que estaban familiarizados.

Américo Vesputio:

"Viajamos tanto por estos mares, que entramos en la zona tórrida, y pasamos la línea

equinoccial por el lado del austro, y del trópico de Capricornio; tanto que el polo del mediodía estaba arriba de mi horizonte cincuenta grados y otro tanto con mi latitud de la línea equinoccial, y navegamos cuatro meses, y veintisiete días, que nunca vimos el polo ártico, ni la Osa mayor, o Menor, por el contrario se me descubrieron por la parte del mediodía muchos cuerpos de estrellas muy claras, las cuales están siempre ocultas a los del septentrión" (tercer viaje).

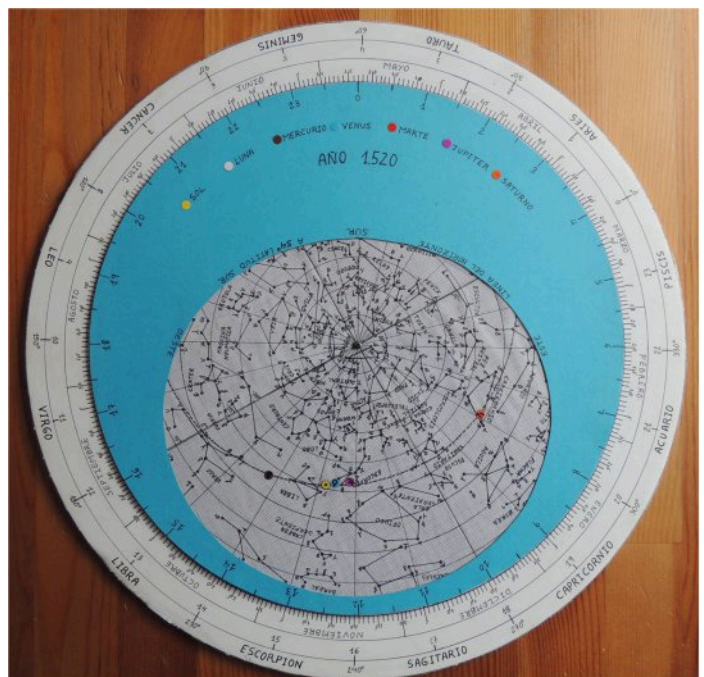


Fig. 7. Planisferio para una latitud de 54° Sur, en aquella época.

En la figura 7 se ve un planisferio celeste del Hemisferio Sur, para una latitud de $\phi = -54^{\circ}$, en el que se representa el cielo que se pudo ver el día 1 de noviembre del año 1520 (calendario juliano). En el mismo se puede apreciar como las constelaciones circumpolares boreales no son visibles cuando se navegaba por latitudes muy al sur, como es el caso, pues en esa fecha la expedición se encontraba atravesando el Estrecho de Magallanes. Es aquí donde Pigafetta recoge en su diario el cielo tal como él lo vio:

"No está el Polo Antártico tan estrellado como el Ártico. Vense muchas estrellas menudas agrupadas, que forman dos nebulosas no muy distantes entre sí ni tampoco con demasiado

resplandor. En el espacio entre ambas surgen dos estrellas mayores, tampoco de gran brillo y muy quietas. Nuestra brújula se desviaba siempre con aquella proximidad del Polo Antártico, cuya atracción era de gran fuerza".

En la cita Pigafetta nos está hablando de las dos Nubes de Magallanes, la grande y la pequeña, mientras que las dos estrellas entre ambas son γ y β de la Hidra Austral, también mencionadas por Vespuccio como "triángulo ortogonal"

Anteriormente también Vespuccio nos había dejado una brillante descripción del cielo que vio en la costa de la Patagonia, durante su tercer viaje (1501-1502).

"El cielo está adornado de bellísimos signos y figuras, en los cuales yo he notado cerca de veinte estrellas de tanta claridad como algunas veces hemos visto a Venus y a Júpiter. Los movimientos y circuitos de ellas he considerado y he medido la circunferencia y el diámetro simplemente por métodos geométricos, y he conocido ser ellas de mayor magnitud. Vi en aquel cielo tres Canopes, dos verdaderamente claros y el otro oscuro. El polo antártico no está representado por la Osa mayor y menor, como nuestro ártico aparece, ni cerca de aquél se ve estrella alguna clara, y de éstas las que son impulsadas con breve órbita alrededor de aquél, tres son las que tienen la figura del triángulo ortogonal, de las cuales la que está en el medio tiene nueve grados y medio de circunferencia; y cuando éstas surgen por la izquierda se ve un Canope blanco de singular grandeza: cuando llegan a mitad del cielo tienen esta figura. Después de éstas vienen otras dos, de las cuales la del medio tiene la circunferencia de doce grados y medio de diámetro y con ellas se ve otro Canope blanco. Y a éste seguían otras seis estrellas bellísimas y clarísimas entre todas las otras de la octava esfera, de las cuales, en la superficie del firmamento, la del medio tiene la circunferencia de treinta y dos grados de diámetro; y con ellas va un Canope negro de una

gran magnitud, y si se ven en la Vía Láctea, cuando están en la línea equinoccial, tienen esta figura".

En la Fig. 8 se puede ver una fotografía de la región del Polo Sur. Se pueden apreciar con claridad las dos nebulosas que cita Pigafetta, las mismas que Vespuccio denomina Canopes, literalmente "tres Canopes, dos verdaderamente claros y el otro oscuro". Con este nombre se refiere a las dos Nubes de Magallanes y a la nebulosa oscura conocida como Saco de Carbón, situada esta última entre las estrellas α y β de la Cruz del Sur.

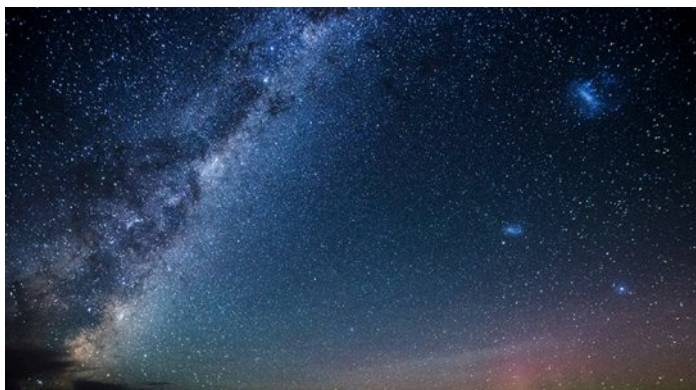


Fig. 8. Las dos Nubes de Magallanes, cerca de la Vía Láctea.

La escuela holandesa

Si desde finales del siglo XV hasta la primera mitad del XVI corresponde el periodo de los grandes descubrimientos geográficos, y también del primer contacto con los cielos del Hemisferio Sur; en los siguientes, el protagonismo en la cartografía estelar de este hemisferio corresponde a los holandeses, que aprovecharon los intereses comerciales de su Compañía de las Indias Orientales, la cual enviaba expediciones a las islas del archipiélago indonesio, compitiendo con portugueses e ingleses en el comercio de las especias. Estos protagonistas fueron: Plancius, Pieter Dirkszoon Keyser y Frederick de Houtman.

Plancius aportó el mapa más antiguo del Hemisferio Sur, en el que además de las 48 constelaciones Ptolemaicas, se ven las dos Nebulosas y las de la Paloma, la Cruz del Sur,

Eridano hasta su estrella α , el Triángulo Austral y otra, que desapareció posteriormente, llamada Polophylax, con siete estrellas.

Tanto Keyser como Houtman iban embarcados en una expedición financiada por esta Compañía de la Indias Orientales, con destino al archipiélago de Indonesia y que transcurrió entre 1595-1597. Keyser murió en la isla de Java, pero le dio tiempo a realizar observaciones astronómicas, que a la vuelta de la expedición, fueron entregadas por Houtman a Plancius y que le sirvieron para añadir doce nuevas constelaciones australes en su globo celeste de 1598. El catálogo de Houtman, elaborado en Madagascar y Sumatra por Keyser antes de su muerte, da la declinación y la ascensión recta de 303 estrellas, ésta última más difícil de interpretar, de las que 107 estaban ya en el catálogo de Ptolomeo y 196 son nuevas. Estas estrellas nuevas se distribuían entre las constelaciones de: Fenix, Corona Austral, Eridano, Hydra, Dorado, Paloma, Argo Navis, Centauro, Cruz, Mosca, Volans, Camaleón, Lobo, Triángulo Austral, Apus, Ara, Pavo, Indio, Grulla y Tucán.

Los instrumentos que utilizaron para realizar las mediciones fueron el astrolabio y el cuadrante. En la Fig. 9 se puede ver el el globo celeste de Petrus Plancius.



Fig. 9. Globo celeste de Petrus Plancius

La configuración definitiva de la carta estelar del Hemisferio Sur

El empujón definitivo para la elaboración del primer atlas moderno y completo del cielo lo dio el astrónomo alemán Johann Bayer, cuando publicó en el año 1603 su atlas estelar "Uranometría". Contaba con las constelaciones clásicas de Ptolomeo más doce nuevas correspondientes al hemisferio sur (Fig. 10) y que había ya divulgado Keyser unos años antes.



Fig. 10. Atlas estelar "Uranometría", del alemán Johann Bayer.

Cada constelación estaba grabada en una placa de cobre con una rejilla que permitía ver la posición de cada estrella. El total de estrellas relacionadas era de 1.200.

Dos avances significativos del Atlas de Bayer fueron: la exactitud en las posiciones estelares, de 1' de arco, gracias a utilizar el catálogo de más de 1.000 estrellas elaborado por Tycho Brahe, que circulaba ya desde 1598; y el uso de una nueva nomenclatura, basada en la magnitud visual de las estrellas de la constelación. Asociaba la letra griega α a la de mayor brillo, y para seguir, mediante el alfabeto griego, recogiendo las magnitudes decrecientes de las otras estrellas. Esta forma de nombrar las estrellas perdura hoy en día.

A lo largo del siglo XVII se fue completando el número de constelaciones registradas por diferentes astrónomos, como Jacob Bartsch, Johannes Hevelius, que introdujo dos nuevas constelaciones del sur (Escudo y Sextante) y John Flamsteed, que aportó como novedad una nueva designación para cada estrella de una constelación, similar a la de Bayer, pero esta vez usando números en vez de letras griegas.

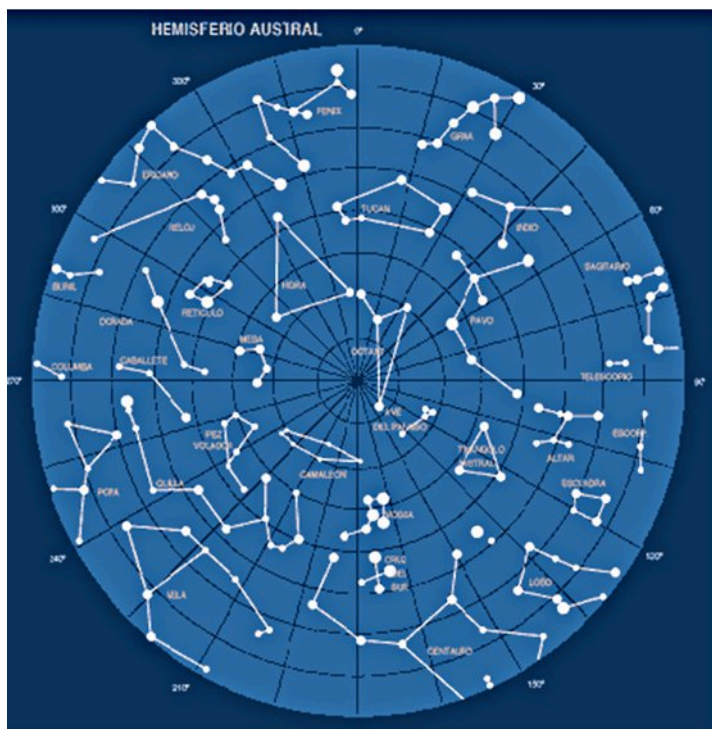
Después, en la primera mitad del siglo XVIII, surge la ingente figura de Nicolás Louis Lacaille, astrónomo francés que organizó una expedición a Sudáfrica entre 1750-1754, financiada por la Academia de las Ciencias. En la ciudad de El Cabo de Buena Esperanza construyó un observatorio, desde el que observó y posicionó más de 10.000 estrellas, identificando entre las mismas catorce nuevas constelaciones australes, a las que dio

nombres de instrumentos científicos y que perduran en la actualidad. Estas constelaciones eran: Antlia, Circinus, Horologium, Fornax, Mensa, Microscopium, Norma, Octans, Pictor, Pyxis, Reticulum, Sculptor y Telescopium.

Al volver a Francia dejó constancia de estas observaciones en su obra "*Coelum australe stelliferum*", publicado en 1763.

Con todas estas aportaciones individuales, en especial la de Lacaille, las Cartas estelares de los dos Hemisferios quedaron definitivamente configuradas.

La Unión Astronómica Internacional fijó en 1922 su número definitivo en 88 constelaciones y delimitó su extensión en el cielo. En la Fig. 11 se pueden ver la mayoría de las constelaciones actuales del Hemisferio Sur.



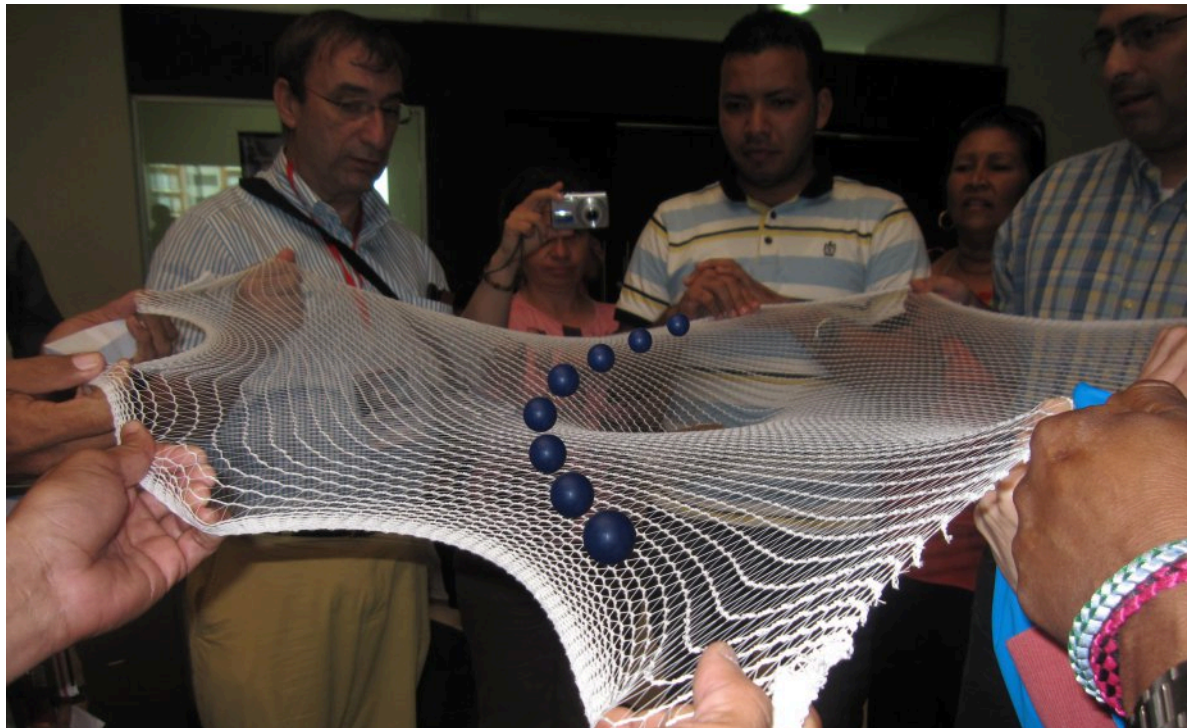
Bibliografía

- Pigafetta, Antonio: "Primer viaje alrededor del mundo". Col. Crónicas de América. Editorial Dastin, Madrid, 2.002.
- De Acosta, José: "Historia natural y moral de las Indias". Col. Crónicas de América. Editorial Dastin, Madrid, 2.002.
- Vespucio, Américo: "El nuevo mundo. Viajes y documentos completos". Coleccion Akal bolsillo. Editorial Akal, Madrid, 1.985.

Fig. 11. Constelaciones del Hemisferio Sur.

MODELOS PARA ENSEÑAR ON LINE LA VIDA DE LAS ESTRELLAS

Ricardo Moreno Luquero



El Taller nº 6 del curso de NASE para profesores trata sobre la vida y evolución de las estrellas. Para explicar los conceptos, se proponen varios modelos sencillos, que puede ser útil conocerlos para la docencia.

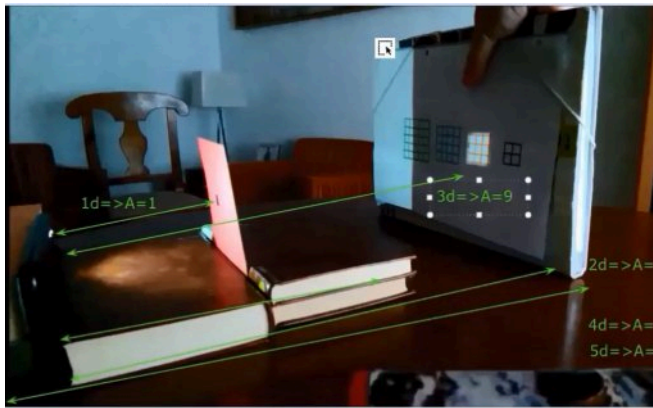
El contenido completo del Taller está disponible en la web de NASE, pero en este artículo quería presentar los videos cortos (1 a 3 minutos) en los que se muestran esos modelos, que pueden servir para la enseñanza on line. Están hechos sin audio, para que el que lo presenta en el curso on line haga las explicaciones que vea oportunas.

El primer modelo, que se ve en este [video](#), es sobre el paralaje, con nuestra mano extendida y cerrando alternativamente un de los dos ojos.

En el segundo modelo (en este [video](#)) se comprueba cómo la intensidad de la luz disminuye con el cuadrado de la distancia.



Modelo de paralaje



La intensidad de la luz disminuye con el cuadrado de la distancia

El tercer modelo se ve en este [vídeo](#), en el que se reproducen los colores de las estrellas, con tres linternas. Entre otras cosas se ve la razón por la que no hay estrellas verdes.



Preparando el modelo de los colores de las estrellas



Colores de las estrellas, con tres linternas y filtros

En el cuarto [video](#) se va haciendo, de forma visual, el diagrama HR del cúmulo abierto El Joyero (o Caja de joyas). A partir de él se deduce la edad del cúmulo.

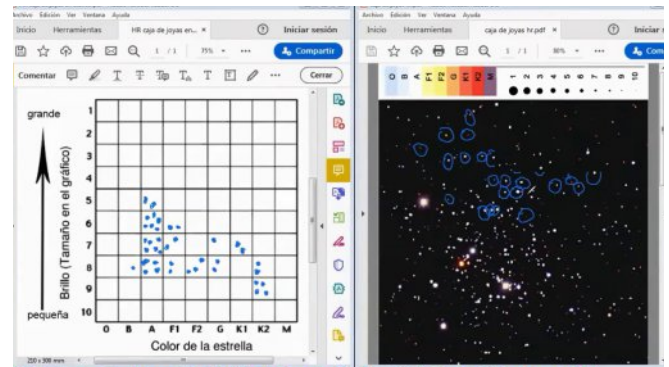


Diagrama HR del cúmulo abierto El Joyero

Las estrellas muy masivas acaban su vida como supernovas. En el siguiente [video](#) se muestra un modelo de explosión de este tipo de estrellas.



Modelo de explosión de supernova, con un balón de basket y una pelota de tenis

Y el resultado de la explosión de una supernova es con frecuencia una estrella de neutrones, que gira emitiendo radiación. El eje de giro no coincide con el chorro de emisión, por lo que, si la orientación es adecuada, lo que detectamos en la Tierra es una emisión pulsante, un púlsar. En este [video](#) se ve cómo hacer un modelo sencillo de este tipo de objetos.



Modelo de púlsar

Si la masa es suficientemente grande, lo que queda después de la explosión de la supernova es un agujero negro. En este [video](#) se visualiza la curvatura del espacio cerca de una masa, e incluso el pozo gravitacional del caso de un agujero negro.



Modelando la curvatura del espacio-tiempo

Esperamos que estos videos sirvan y den ideas para la enseñanza de la Astronomía.

Referencias:

Web de NASE: <http://sac.csic.es/astrosecundaria/es/Presentacion.php>

Canal de YouTube de NASE:

https://www.youtube.com/channel/UClhE_31rV-895n_fm069PgA/



OBSERVACIÓN DE LAS LUNAS Y ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE JÚPITER

Anicet Cosials y Laura Latorre



En este artículo se propone un método experimental para determinar los periodos orbitales de los cuatro satélites galileanos. Para ello se observa su movimiento durante dos meses con una webcam acoplada al foco primario de un telescopio. Con esos datos se hace una estimación de la masa de Júpiter y de su densidad, lo que nos permitirá dilucidar si es un planeta rocoso o gaseoso.

Introducción

Los satélites galileanos son las cuatro lunas más grandes del planeta gaseoso Júpiter.

Galileo Galilei (1564-1642) fue el primero en descubrirlos en 1610 utilizando un telescopio rudimentario construido por sí mismo. Después de múltiples observaciones, se dio cuenta de que estas supuestas estrellas permanecían cerca del planeta y parecían moverse con respecto a éste y

a las otras. Finalmente, concluyó que se trataba de cuerpos planetarios que estaban en órbita alrededor de Júpiter.

Este descubrimiento fue muy significativo porque mostró que no todos los cuerpos celestes orbitaban alrededor de la Tierra, y que ésta no era el centro del Universo. Así, permitió reforzar la teoría heliocéntrica de Copérnico, que Galileo ya defendió desde el principio.

Estos satélites reciben este nombre en honor a su descubridor, pero fue Simón Marius quien en 1614 les dio nombre mitológico en correspondencia con las sugerencias de Kepler: Ío, Europa, Ganímedes y Calisto.

Además de los mencionados satélites galileanos, las distintas sondas espaciales enviadas a Júpiter (Pioneer, Voyager, Galileo) y observaciones desde la Tierra han ampliado el número total de satélites de Júpiter hasta 79.

Vamos a ver cómo determinar los periodos orbitales de los cuatro satélites galileanos, y además, haremos una estimación de la masa de Júpiter y de su densidad, lo que nos permitirá dilucidar si es un planeta rocoso o gaseoso.

El artículo está basado en el trabajo de investigación realizado por Laura Latorre^[1], exalumna del Institut Guindàvols, durante el curso 2008-2009, con el asesoramiento del autor, y fue galardonado con el primer premio en el concurso internacional Ciencia en Acción 2009, en la modalidad "Adopta una estrella".

Objetivos

Queríamos observar y fotografiar los satélites galileanos de Júpiter. A partir de ahí, determinar el radio medio de sus órbitas, y hacer una estimación de dos parámetros físicos relevantes de Júpiter: su masa y su densidad.

Capturamos las imágenes de Júpiter junto a sus 4 satélites con una webcam Meade LPI acoplada al foco primario del telescopio Meade LX90GPS. Determinamos la posición relativa de los satélites respecto del centro de Júpiter (p.ej. con el programa AUTOCAD 2007). Las posiciones se expresan en radios de Júpiter, con valores positivos si se encuentran a la derecha del planeta y negativos si se encuentran a la izquierda.

Al ser las órbitas de las lunas prácticamente circulares (tienen excentricidades próximas a cero) el radio medio r de cada una de las órbitas es la elongación máxima.

Para determinar el periodo de los satélites supondremos que su movimiento alrededor de Júpiter es circular uniforme. La inclinación orbital^[2] de los cuatro satélites es casi cero, por lo que se están moviendo todos en el plano de la eclíptica; por consiguiente, el movimiento aparente visto desde la Tierra puede asimilarse a un movimiento armónico simple.

A la hora de describir el movimiento de los satélites, supondremos que en el instante $t = t_1$ el satélite se encuentra en la posición A y en el instante $t = t_2$ en la posición B.

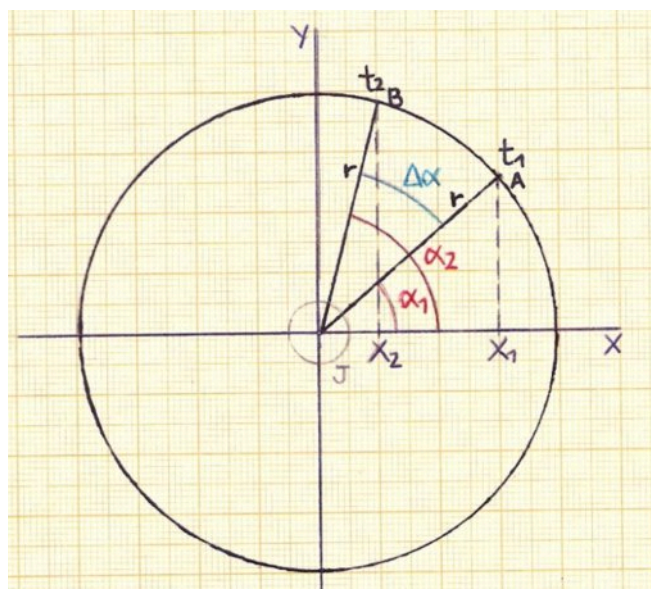


Imagen 1 Descripción del movimiento de un satélite alrededor de Júpiter.

Sea r el radio de la órbita descrita por el satélite, y α_1 y α_2 los ángulos formados entre el radio y el eje de abscisas (X) en las posiciones A y B. Denominaremos X_1 y X_2 a las proyecciones de los puntos A y B sobre el eje de abscisas (Imagen 1).

De la Imagen 1 se deduce:

$$\cos \alpha_1 = \frac{X_1}{r} \Rightarrow \alpha_1 = \arccos\left(\frac{X_1}{r}\right)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{X_2}{r} \Rightarrow \alpha_2 = \arccos\left(\frac{X_2}{r}\right)$$

Por otra parte, en un movimiento circular uniforme se define la velocidad angular:

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

Siendo, $\Delta\alpha$, el desplazamiento angular (rad), y Δt , el tiempo transcurrido (s).

Si, $\Delta t = T$ (Periodo) $\rightarrow \Delta\alpha = 2\pi$ (rad)

$$\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$$

Aislando el periodo:

$$T = \frac{\Delta t}{\Delta\alpha(\text{rad})} \times 2\pi(\text{rad}) = \frac{t_2 - t_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \times 2\pi(\text{rad})$$

Si se tiene en cuenta que 2π (rad) = 360° , la expresión anterior se puede expresar como:

$$T = \frac{\Delta t}{\Delta\alpha(^{\circ})} \times 360^{\circ} = \frac{t_2 - t_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \times 360^{\circ}$$

Material



Telescopio Meade LPX90GPS de 20 cm de diámetro y 2000 mm de distancia focal



Programa AutoStar Suite



Programa Stellarium



Webcam LPI



Programa AUTOCAD 2007



Webcam adaptada al foco primario del telescopio y conectada al portátil

Se ha de dirigir el telescopio hacia Júpiter y sus satélites, y capturar fotos con la "webcam LPI" acoplada al foco primario del telescopio. Para regular el tiempo de exposición usamos el programa propio de la webcam, AutorStar Suite. Se anotará el día y la hora en que se han hecho las tomas. Este proceso se repetirá durante varios días, de esta manera nos aseguraremos obtener imágenes de los satélites en distintas posiciones relativas. Cuantas más tomas mejor, puesto que es imprescindible disponer, al menos, de una imagen de cada uno de los satélites con su alejamiento (elongación) máximo. El alejamiento máximo coincidirá con el radio de la órbita.



Imagen 2. Posición de Júpiter y de los satélites galileanos el día 13/11 de 2008 tal como se vieron desde la Tierra según el programa Stellarium



Imagen 3. Fotografía de Júpiter realizada con una webcam acoplada al foco primario del telescopio. La imagen resulta invertida.

La identificación de los satélites se hace con el programa Stellarium^[2] (Imágenes 2 y 3).

Para la observación de Ío y Europa es aconsejable hacerla cada dos horas; para Ganímedes, durante un mínimo de 4 días con dos o tres observaciones diarias, para Calisto un mínimo de ocho días con una o dos observaciones diarias.

El radio de la órbita de los satélites se medirá utilizando el programa AUTOCAD (Imagen 4). Habrá que medir también el radio de Júpiter y expresar el resultado de las orbitas en radios de Júpiter.

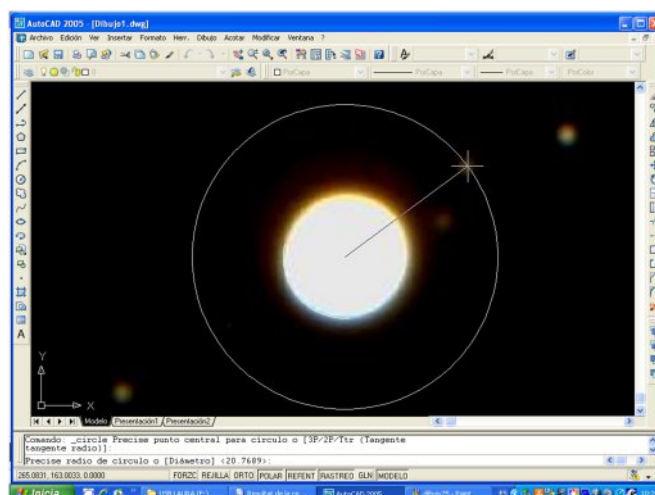


Imagen 4. Medida de las distancias de los satélites al centro de Júpiter

Se complementará la tabla de la Imagen 5. En el cuadro amarillo se pondrán los valores máximos, que se corresponderán con los radios de sus órbitas. Utilizaremos los signos + o - para indicar la posición derecha o izquierda de los satélites respecto de Júpiter.

Distancias al centro de Júpiter, en radios de Júpiter					
Día	Hora (UT)	Ío	Europa	Ganímedes	Calisto

Imagen 5. Tabla de seguimiento de los satélites de Júpiter con los radios de sus órbitas.

Una vez conocidos los radios de las órbitas y los tiempos, se calculan los respectivos períodos orbitales, cumplimentando la tabla que sigue para cada satélite (Imagen 6).

t_1 [días]	t_2 [días]	α_1 [grados]	α_2 [grados]	$t_2 - t_1$ (Δt) [días]	$\alpha_2 - \alpha_1$ ($\Delta \alpha$) [grados]	$T = \frac{(t_2 - t_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \times 360$ [días]

Imagen 6. Tabla de datos, y cálculos para determinar el periodo orbital de cada satélite.

Habrá que tener cuidado con el tiempo transcurrido, Δt , desde la posición inicial a la final, porque es posible que el s telite haya dado más de una vuelta, o que est  en otro cuadrante. Con esto, se tendrán que considerar todas las posibilidades para el desplazamiento angular, $\Delta\alpha$, compatibles con un determinado valor del coseno de dicho  ngulo.

Resultados obtenidos. Análisis.

Las observaciones se realizaron desde el patio del Institut Guind vols de Lleida (latitud 41,6260 N, longitud de 0,6260 E, altitud 200 m) entre el día 01-10-2008 y el 14-11-2008.

Los resultados figuran en la tabla que sigue (Imagen 7).

En amarillo, aparecen los valores de alejamiento máximo. Los consideraremos los radios medios de las órbitas (r).

Cálculo de los períodos orbitales de los s telites

S telite  o

$t_1 = 0$ días ; $X_1 = +2,17$ radios de Júpiter

$t_2 = 2,04$ días ; $X_2 = -3,49$ radios de Júpiter

$r = 5,61$ radios de Júpiter

$$\alpha_1 = \arccos \left(\frac{X_1}{r} \right) = \arccos \left(\frac{2,17}{5,61} \right) = 67,2^\circ$$

$$\alpha_2 = \arccos \left(\frac{X_2}{r} \right) = \arccos \left(\frac{-3,49}{5,61} \right) = 128,5^\circ$$

Al ser $\cos(\alpha_2) < 0$, $\rightarrow \alpha_2$ puede pertenecer al segundo o al tercer cuadrante.

Las posibles soluciones son:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 128,5^\circ, \\ \alpha_2 &= 360^\circ - 128,5^\circ = 231,5^\circ, \\ \alpha_2 &= 360^\circ + 128^\circ = 488,5^\circ \end{aligned}$$

Al ser $\Delta t = 2.04$ días $> T_{\text{Io}} \rightarrow \text{ o}$ habrá dado ya una vuelta, por lo tanto:

Distancia al centro de Júpiter, en radios de Júpiter							
Día	Hora (UT)	Tiempo (h)	Tiempo (días)	�o	Europa	Ganímedes	Calisto
01-10-08	18:41	0	0	+2,17	+7,20	+6,00	+7,94
03-10-08	19:37	48,93	2,04	-3,49	-3,14	+11,05	-10,68
06-10-08	19:35	120,90	5,04	+5,61	-8,85	-14,29	-25,13
10-10-08	18:15	215,56	8,98	-	-6,28	+13,87	-1,63
24-10-08	18:01	551,33	22,97	+2,65	-7,82	+13,11	-21,79
24-10-08	18:28	551,55	22,98	+2,64	-7,59	+13,57	-21,40
27-10-08	18:05	623,4	25,98	+3,13	-7,08	-12,38	-
27-10-08	19:12	624,51	26,02	+3,85	-7,31	-12,48	-
7-11-08	17:45	887,06	36,96	+1,52	-4,95	+5,98	-11,71
8-11-08	17:24	910,72	37,95	-3,73	+1,54	+9,88	-21,89
8-11-08	17:55	911,23	37,97	-3,42	+1,93	+9,73	-22,07
13-11-08	18:10	1031,15	43,01	-4,12	+1,53	+2,49	+3,89
14-11-08	18:12	1055,52	43,98	4,19	-6,76	+10,26	+8,40
				+ 5,61	-8,85	-14,29	-25,23

Imagen 7. Tabla de datos con las distancias de los s telites al centro de Júpiter

$$\alpha_2 > 360^\circ \rightarrow \alpha_2 = 128,5^\circ + 360^\circ = \mathbf{488,5^\circ}$$

$$T = \frac{\Delta t}{\Delta \alpha} \times 360 = \frac{2,04 - 0}{488,5 - 67,2} \times 360 = \mathbf{1,74 \text{ días}}$$

Se ha hecho otro cálculo, cuyos resultados quedan reflejados en la tabla de la Imagen 8.

t_1 [días]	t_2 [días]	α_1 [grados]	α_2 [grados]	$t_2 - t_1$ [días]	$\alpha_2 - \alpha_1$ [grados]	$T = \frac{(t_2 - t_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \times 360$ [días]
0	2,04	67,24	488,5	2,04	421,2	1,74
2,04	5,04	488,5	1080	3,00	591,5	1,83
						$\bar{T} = 1,785$

Imagen 8. Tabla de datos con los cálculos para determinar el periodo orbital de Ío

El valor real del periodo de Ío es 1,77 días, con lo que el error relativo cometido en la determinación es del 1,1 %

Satélite Europa

$t_1 = 0$ días ; $X_1 = + 7,20$ radios de Júpiter

$t_2 = 2,04$ días ; $X_2 = - 3,14$ radios de Júpiter

$r = 8,85$ radios de Júpiter

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{X_1}{r}\right) = \arccos\left(\frac{7,20}{8,85}\right) = 35,6^\circ$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{X_2}{r}\right) = \arccos\left(\frac{-3,14}{8,85}\right) = 110,8^\circ$$

Al ser $\cos(\alpha_2) < 0$, $\rightarrow \alpha_2$ puede pertenecer al segundo o al tercer cuadrante.

Las posibles soluciones son:

$$\alpha_2 = 110,8^\circ \text{ y } \alpha_2 = 360^\circ - 110,8^\circ = 249,2^\circ$$

En un principio desconocemos cuál de los dos posibles ángulos proporciona un valor del periodo que se asemeje al valor real. Para ello probamos con los dos ángulos:

$$T = \frac{\Delta t}{\Delta \alpha} \cdot 360 = \frac{2,04 - 0}{110,8 - 35,6} \cdot 360 = 9,77 \text{ días}$$

$$T = \frac{\Delta t}{\Delta \alpha} \cdot 360 = \frac{2,04 - 0}{249,2 - 35,6} \cdot 360 = \mathbf{3,44 \text{ días}}$$

El segundo valor es que más se aproxima al verdadero valor (3,55 días).

Repitiendo una vez más el mismo proceso con otros datos confeccionamos la siguiente tabla (Imagen 9).

t_1 [días]	t_2 [días]	α_1 [grados]	α_2 [grados]	$t_2 - t_1$ [días]	$\alpha_2 - \alpha_1$ [grados]	$T = \frac{(t_2 - t_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \times 360$ [días]
0	2,04	35,5	249,2	2,04	213,7	3,44
2,04	5,04	249,2	540	3,00	290,8	3,71
						$\bar{T} = 3,58$

Imagen 9. Tabla de datos con los cálculos para determinar el periodo orbital de Europa

El periodo de Europa encontrado es 3,58 días, con un error relativo del 0,85%

Satélite Ganímedes

El resumen de los cálculos queda, reflejados en la tabla de la Imagen 10.

t_1 [días]	t_2 [días]	α_1 [grados]	α_2 [grados]	$t_2 - t_1$ [días]	$\alpha_2 - \alpha_1$ [grados]	$T = \frac{(t_2 - t_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \times 360$ [días]
2,04	5,04	39,4	180	3,00	140,7	7,68
5,04	8,98	180	373,9	3,94	193,8	7,31
						$\bar{T} = 7,50$

Imagen 10. Tabla de datos con los cálculos para determinar el periodo orbital de Ganímedes

El periodo encontrado de Ganímedes es de 7,50 días. El verdadero valor es de 7,17 días.

El error relativo es del 4,6%.

Periodo de Calisto

Los cálculos están resumidos en la tabla adjunta (Imagen 11).

t_1 [días]	t_2 [días]	α_1 [grados]	α_2 [grados]	$t_2 - t_1$ [días]	$\alpha_2 - \alpha_1$ [grados]	$T = \frac{(t_2 - t_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \times 360$ [días]
0	2,04	71,6	115,2	2,04	43,6	16,84
2,04	5,04	115,15	180	3,00	64,9	16,64
						$\bar{T} = 16,74$

Imagen 11. Tabla de datos con los cálculos para determinar el periodo orbital de Calisto

El valor encontrado para el periodo de Calisto es de 16,74 días, casi idéntico al valor real (16,76 días). El error relativo es del 0,24%.

Cálculo de la masa de Júpiter

La ley de la gravitación universal nos da la posibilidad de determinar un nuevo dato astronómico: la masa M de Júpiter.

Para ello, debemos únicamente conocer el radio r del satélite que orbita el planeta, su periodo T , y la constante de gravitación universal $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Aplicaremos una fórmula que vamos a deducir a continuación.

Llamaremos m a la masa del satélite, v a su velocidad, y M a la masa de Júpiter (Imagen 12).

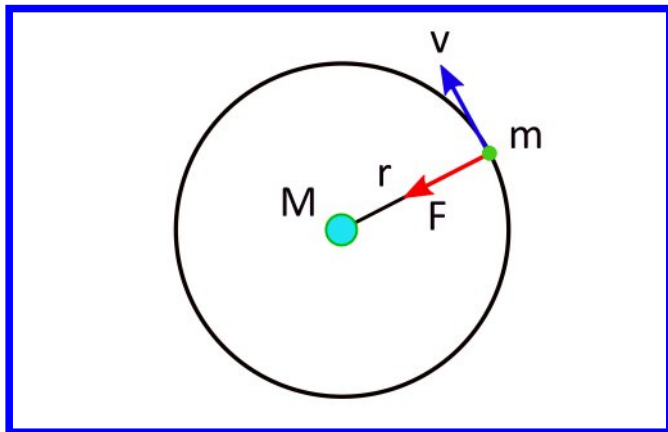


Imagen 12 Fuerza que actúa sobre un satélite que orbita a Júpiter

Los satélites de Júpiter giran alrededor del planeta describiendo órbitas circulares para los cuales la fuerza de atracción gravitatoria:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$$

proporciona una fuerza normal o centrípeta:

$$F_n = m \cdot a_n = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

necesaria para que produzca un movimiento circular uniforme.

Es decir:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

A partir de la igualdad anterior podemos encontrar la velocidad a la que orbita el satélite. Se puede eliminar la masa m , pues no influye al estar multiplicando en ambos miembros:

$$v^2 = \frac{GM}{r} \quad (\text{Fórmula 1})$$

Por otra parte, sabemos que la relación entre la velocidad lineal v , y la velocidad angular ω , viene dada por la expresión:

$$v = \omega \cdot r = \frac{2\pi}{T} \cdot r$$

Elevando al cuadrado la velocidad v :

$$v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} \quad (\text{Fórmula 2})$$

Iguamos las Fórmulas 1 y 2, y despejamos la masa M de Júpiter:

$$\frac{GM}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}$$

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \quad (\text{Fórmula 3})$$

Para conocer el valor absoluto de los radios de las órbitas se tendrá en cuenta que el radio de Júpiter es 71.400 km.

Aplicando la fórmula 3 se ha completado la siguiente tabla (Imagen 13).

Satélite	T (s)	r (m)	$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$ (kg)
Io	$1,55 \cdot 10^5$	$4,01 \cdot 10^8$	$1,59 \times 10^{27}$
Europa	$3,09 \cdot 10^5$	$6,33 \cdot 10^8$	$1,57 \times 10^{27}$
Ganímedes	$6,48 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^9$	$1,50 \times 10^{27}$
Calisto	$1,45 \cdot 10^6$	$1,80 \cdot 10^9$	$1,64 \times 10^{27}$
Imagen 13 Tabla de datos para la determinación de la masa de Júpiter			$\bar{M} = 1,58 \times 10^{27}$

El valor de la masa de Júpiter es $M = (1,58 \pm 0,08) \cdot 10^{27} \text{ kg}$. Si se compara con el valor real ($M = 1,898 \cdot 10^{27} \text{ kg}$), el error relativo es del 16,8 %.

Estimación de la densidad de Júpiter

Conocido el radio R de Júpiter, se puede hacer una estimación de su volumen V . Para ello supondremos que es una esfera, cuyo volumen se puede calcular aplicando la fórmula:

$$V = \frac{4\pi R^3}{3}$$

Sabiendo que la densidad d es la relación entre la masa M y el volumen:

$$d = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4\pi R^3}{3}}$$

Sustituyendo valores:

$$d = \frac{M}{\frac{4\pi R^3}{3}} = \frac{1,58 \times 10^{27}}{\frac{4\pi \times (7,14 \times 10^7)^3}{3}} = 1,04 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

Si la comparamos con la densidad real $1,33 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, el error relativo cometido en la estimación es del 21,8%

La densidad de Júpiter es muy pequeña por lo que no puede ser un planeta rocoso.

Este proyecto, realizado por la exalumna Laura Latorre, obtuvo el primer premio en Ciencia en Acción 2009 (Imagen 14).

Referencias bibliográficas

1. Laura Latorre, 2009. Seguint les petjades còsmiques. Consultado el 29/11/2020. Disponible en

<http://www.xtec.cat/iesguindavols/laura/treball.pdf>

2. Programa Stellarium:

<https://stellarium.org/es/>

3. Galadí, D. y Gutiérrez, J., El sistema joviano, Astronomía General, página 358, Ediciones Omega (2001).

4. Hormigo, T., La masa del Sol. Las medidas del universo, páginas 80-81. Editorial Marfil (1985).



Imagen 14. Laura Latorre, recogiendo en Granada el primer premio en el Certamen Ciencia en Acción de 2009.

Comentarios al trabajo '*Observación de las lunas de Júpiter*': Ideas para un siguiente paso.

Joaquín Álvaro

El trabajo comentado está realizado por una alumna de secundaria, lo que tiene un gran mérito por su parte y por el de su profesor, reconocidos por los premios que obtuvieron en su momento. Sin embargo, ese origen conlleva lógicamente unas limitaciones en los supuestos, en el método y en las conclusiones. Cumpliendo los objetivos didácticos de la revista, nos gustaría proponer a alumnos y profesores, posibles ampliaciones, y mejoras de este trabajo, con objeto de hacer repetible la experiencia (de indudable valor formativo), incidiendo en los puntos críticos que son susceptibles de mejora y que disminuirían sensiblemente el elevado rango de error en los resultados finales que se pone de manifiesto en el propio trabajo referenciado. Somos conscientes de que estamos añadiendo complejidad al trabajo, pero nos parece una oportunidad muy buena de aproximarse y enseñar a trabajar como hacen los astrónomos profesionales. Uno de ellos es el que ha hecho estas propuestas.

Básicamente centraremos la atención en los siguientes aspectos, que serían los puntos para mejorar:

1. Determinación del radio del planeta Júpiter a partir de las imágenes obtenidas en la fase empírica del proyecto.

Esta medición es importante porque afecta a la calibración del resto de medidas (radios orbitales incluidos) y, especialmente, a la valoración del volumen asignado a Júpiter para el cálculo de su densidad, como se pretende finalmente.

2. El sistema Júpiter-Satélites: en las aproximaciones y supuestos considerados, habría que hacer una mejor estimación de cómo pueden afectar a la interpretación de los resultados y en qué orden de magnitud se reflejan los posibles márgenes de error. También sería conveniente presentar con más detalle el sistema de referencia respecto al que se establecen las medidas que sirven de base a todo el proyecto.

3. Modelo del sistema y metodología de trabajo:

Se propone aquí un modelo más sencillo, pero también más riguroso, para la determinación de los movimientos orbitales y el cálculo de los periodos relativos a los satélites estudiados.

4. Base estadística del conjunto de datos observacionales.

Es preciso aumentar significativamente el número de observaciones sobre las que efectuar las medidas. Esto es algo necesario en todos los trabajos que pretendan presentar resultados con cierto rigor.

En lo que sigue haremos uso de imágenes obtenidas de Stellarium y de otras fuentes con el único objeto de ilustrar los puntos tratados. Se entiende que en ningún momento estas imágenes deben emplearse para sustituir a las propias de la fase experimental del trabajo, que tendrían que ser las únicas contempladas en un trabajo de esta naturaleza.

1. Determinación del radio de Júpiter

a) En el trabajo de referencia que comentamos el radio del planeta Júpiter se da como un valor conocido: $R_J = 71.400 \text{ km}$. Pero esto no evita la necesidad de hacer mediciones del mismo en cada una de las imágenes que resultan de las observaciones realizadas, puesto que las respectivas distancias de los satélites en cada observación se miden y estiman en relación a un número de radios (R_J).

Por tanto, al menos una vez durante el tiempo que dure el desarrollo de esta fase observacional, debería hacerse una estimación rigurosa del tamaño angular que cubre el planeta en las imágenes obtenidas. Y esto siempre que el resto de las observaciones se puedan hacer sobre una posición en el cielo del sistema (Júpiter, satélites) similar en altura sobre el horizonte, y también que las características del sistema óptico (telescopio-cámara) no sean alteradas durante todo el tiempo del periodo observacional. Aún así, las condiciones de turbulencia atmosférica no dependen del observador y no se puede garantizar que haya uniformidad en las diferentes sesiones de captura de imágenes. Como también es difícil asegurar que las condiciones anteriores se mantengan estables, lo idóneo es medir el tamaño angular del planeta en cada sesión de observación. Esto además dará garantías acerca de la calibración de las escalas en las imágenes obtenidas en las diferentes observaciones.

Un problema que presenta la fotografía planetaria cuando se pretende incluir en una misma imagen los satélites junto a su planeta anfitrión, (es lo mismo para Júpiter que para Saturno), se debe al diferente brillo del planeta frente al de sus satélites. Si se ajusta el tiempo de exposición para que aparezcan los satélites,

la imagen del planeta quedará saturada y esto supone también un rebosamiento en píxeles alrededor del planeta. Es decir, se verá un poco más grande de lo que es en realidad. Véase la Figura 1.



Figura 1.

Esto es algo que también se aprecia en las imágenes 3 y 4 del trabajo de referencia, en las que incluso aparecen halos de aberración cromática que dificultan hacer medidas precisas.

Una manera de evitar este inconveniente es hacer una primera fotografía en cada sesión ajustando el tiempo de exposición para obtener una imagen no saturada del planeta (Fig. 2). Ésta es la que debe emplearse para medir el tamaño angular de Júpiter y después ya, sin



Figura 2.

hacer ningún cambio en el sistema óptico, se procederá a aumentar el tiempo de exposición para captar las imágenes que incluyan los satélites. En estas segundas imágenes ya se miden las distancias de los satélites a un punto estimado como el centro del planeta, que se expresarán en unidades de R_j con el valor obtenido en la imagen no saturada.

Como en todo trabajo experimental, convendrá no limitarse a una única imagen de ambos tipos por sesión. Lo lógico es hacer varias con sus respectivas medidas independientes, a ser posible por personas diferentes, y establecer después el valor medio de las distintas medidas con los márgenes de error derivados del proceso.

b) Llegados aquí puede ser interesante **calibrar el sistema óptico** empleado a partir de las imágenes obtenidas. Esto es, determinar el ángulo de cielo (en segundos de arco) cubierto por cada píxel de la imagen, (o si se prefiere, el ángulo correspondiente a 1 cm en la imagen, el caso es tener siempre una idea precisa de la escala real de las imágenes utilizadas).

Esto último es algo que debería hacerse sistemáticamente con toda imagen que se utilice con propósitos empíricos de medidas, etc. Incluso, aunque en este trabajo no sea estrictamente necesario, puede ser muy ilustrativo añadir este objetivo como algo de sumo interés desde el punto de vista de la metodología de trabajos con imágenes en astronomía.

Básicamente hay dos procedimientos para hacer esta calibración. Uno fácil y otro un poco más laborioso. El fácil consiste en recurrir a las características teórico-nominales de los elementos que componen el sistema óptico: distancia focal del telescopio expresada en milímetros, f (mm), y tamaño del píxel de la CCD, que se facilita en las especificaciones

técnicas del fabricante normalmente en micrómetros, $l(\mu m)$. Con estos dos parámetros se tiene una sencilla relación que ofrece un valor muy aceptable del ángulo de cielo en segundos de arco que capta cada píxel, s'' , que viene dada por:

$$s'' = 206,265 \frac{l(\mu m)}{f(mm)}$$

Esta relación sólo es válida con la cámara a foco primario y si no se introducen otros elementos en el sistema óptico, (reductores de focal, barlows, etc.), y siempre estará a expensas de la exactitud de los valores de los dos parámetros utilizados.

Con este valor s'' , ya es posible conocer el ángulo correspondiente a cualquier otra distancia dentro de la imagen:

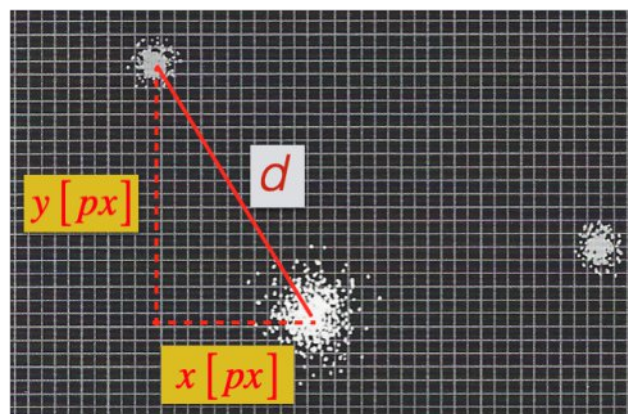


Figura 3.

Donde

$$d'' = s'' \sqrt{(x^2 + y^2)_{px}}$$

Pero, si no se tiene seguridad de los valores nominales de los parámetros f y l , o bien el sistema óptico tiene elementos adicionales, debe recurrirse a una calibración ad hoc de todo el sistema. Éste sería el procedimiento más laborioso.

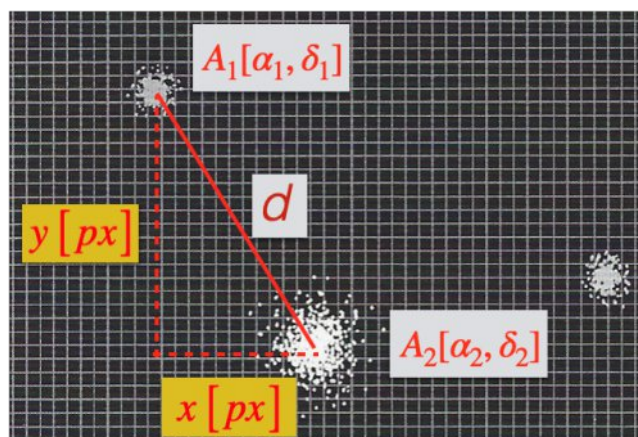


Figura 4.

En este caso debería buscarse un campo estelar adecuado donde varias estrellas entren en el campo de visión y proceder con ellas por parejas tal como se muestra en la imagen anterior. Es preciso conocer, una vez identificadas, sus respectivas coordenadas celestes para lo que se debiera recurrir a un catálogo o atlas del cielo.

Ahora se tiene que, a partir de las coordenadas (ecuatoriales en este caso), el ángulo subtendido por el par de estrellas $[A_1, A_2]$ es:

$$\cos d = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

donde el único cuidado a tener es el de expresar las magnitudes en unidades coherentes, y a partir de ahí:

$$s (") = \frac{d (")}{\sqrt{(x^2 + y^2)_{px}}}$$

En todos los casos, se recalca una vez más la necesidad de repetir estas medidas y procedimientos el número de veces necesario para tener una base estadística suficiente que minimice el impacto de los errores inherentes a todos los procesos de medida.

c) Si se ha llegado hasta aquí, ya puede hacerse una estimación de la calidad del sistema calibrado y también de nuestra habilidad para

hacer las mediciones. Por ejemplo, a partir de la estimación del tamaño de Júpiter en las imágenes no saturadas, $r_j (")$, y recurriendo a la distancia real, $d (km)$, de Júpiter a la Tierra proporcionada por una fuente externa de efemérides para la fecha/hora de la observación, se puede determinar el radio del planeta medido empíricamente:

$$R_j (km) = d (km) \cdot \tan r_j (")$$

Si el resultado no es aceptable, y con pequeño margen de error, algo se ha hecho mal y convendría revisar todo el procedimiento antes de continuar adelante con más trabajo. Este ejercicio debe ayudar también a proveer de cierta habilidad a los experimentadores en las tareas de realizar las medidas.

2. El sistema Júpiter-Satélites

Antes de iniciar un proyecto como éste deben hacerse algunas estimaciones sobre el escenario del sistema que será objeto de estudio. Como puede verse en la figura que sigue, (fig. 5), el objetivo de estudiar a partir de imágenes reales el conjunto de los cuatro satélites galileanos implica un campo visual de unos 20' de arco. Esto condicionará el sistema

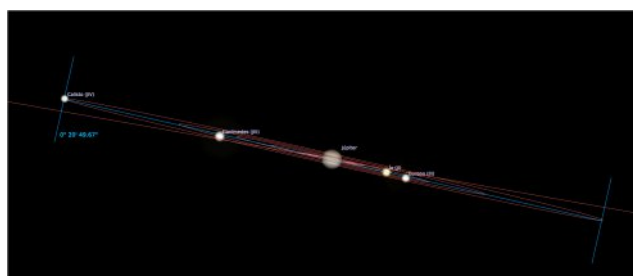


Figura 5.

óptico a utilizar, tanto a nivel del chip de la cámara como de la focal del telescopio, que seguramente hará necesario un reductor de focal. Una solución de emergencia puede ser desdoblarse en cada sesión de observación la parte derecha del sistema y la parte izquierda, duplicando las imágenes obtenidas, siempre

conservando la escala y con el planeta incluido en ambas tomas. Con esto se reduciría la necesidad de un campo visual tan amplio a poco más de la mitad, ($\sim 12'$ de arco).

No obstante, si se hace preciso un reductor de focal, el calibrar debidamente el sistema óptico por el segundo procedimiento descrito en el punto anterior se convierte en necesario.

Por otra parte, los supuestos de partida: órbitas de los satélites con excentricidad muy pequeña (órbitas circulares) e inclinación orbital de estos casi nula, que permiten reducir el problema y dar por buenas las aproximaciones de considerar el sistema en un mismo plano, hay que tomarlos con ciertas reservas, en especial el segundo de ellos, ya que aunque la inclinación orbital de los satélites sea despreciable respecto al plano ecuatorial del

planeta, la inclinación axial de Júpiter respecto al plano de la eclíptica es de unos 3° , lo que significa que dependiendo de la posición relativa de Júpiter y la Tierra el sistema no se verá orientado en un plano con un perfil de inclinación cero. Véase la Figura 6.

Como se puede comprobar en esta figura, los satélites no harán tránsitos que pasen por el centro del planeta, algunos quedarán incluso fuera del disco de Júpiter en su mayor aproximación visual.

Estas circunstancias hay que tenerlas en cuenta a la hora de tratar los datos obtenidos y las aproximaciones iniciales pueden dejar de ser asumibles.

Si las observaciones se hacen en una época idónea, con el plano orbital de los satélites alineado respecto a la visual con un perfil similar al de la primera figura, el modelo de trabajo puede ser más sencillo y pueden darse por buenas las aproximaciones estimadas en el trabajo de referencia.

En estas condiciones óptimas todas las imágenes capturadas pueden ser reorientadas

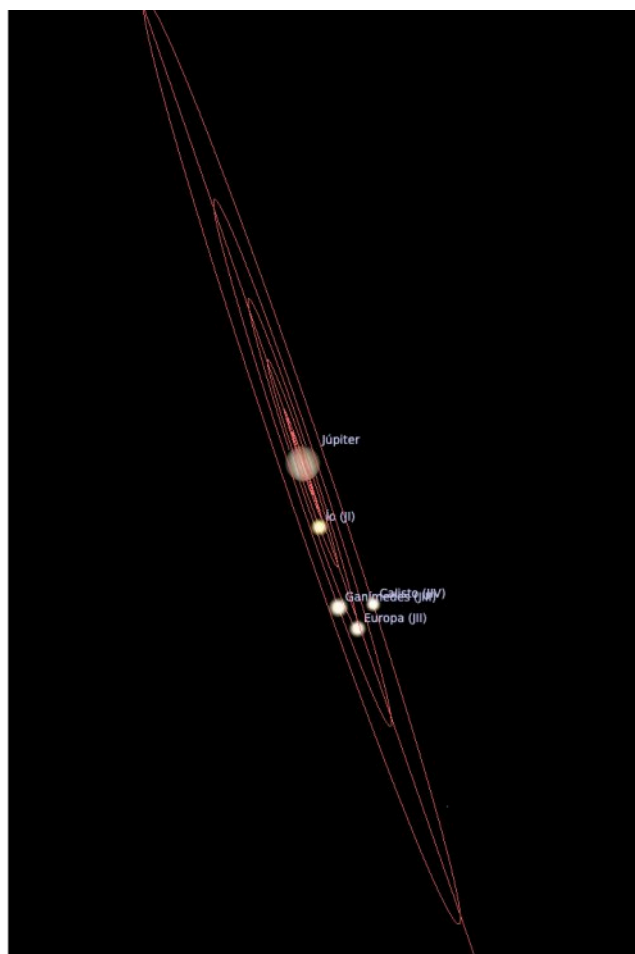


Fig. 6 - (Stellarium – simulación para el año 2012)

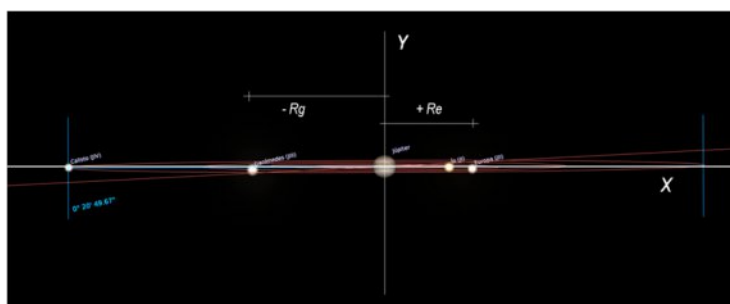


Fig. 7

aplanadas) y las medidas de distancias de los satélites al centro del sistema de referencia, (Júpiter), pueden reducirse a un único eje (x) sin cometer por ello errores significativos.

Se tomarían valores negativos para las distancias a los satélites situados a la izquierda del eje (y) y positivos para los situados a la derecha.

3. Modelo del sistema y metodología de trabajo

a) En las condiciones óptimas señaladas, donde las aproximaciones que simplifican el modelo pueden darse por aceptables, el problema puede tratarse bajo el carácter de un movimiento armónico simple con dos variables $[x,t]$, siendo x la distancia medida del satélite al centro del sistema de referencia (Júpiter) y t el tiempo en el que se efectúa la medida:

$$x(t) = R_{orb} \cos(\omega t + \phi)$$

El resto de los parámetros en la ecuación son el radio orbital R_{orb} , la velocidad angular ω , y una fase ϕ . Los valores empíricos medidos serían $[x,t]$ y los parámetros a determinar en cada caso son $[R_{orb}, \omega]$.

También en esta fase de preparación debe hacerse una estimación del rango de posibles resultados esperados. En el caso que tratamos se debería esperar algo similar a lo que se presenta en la Figura 8.

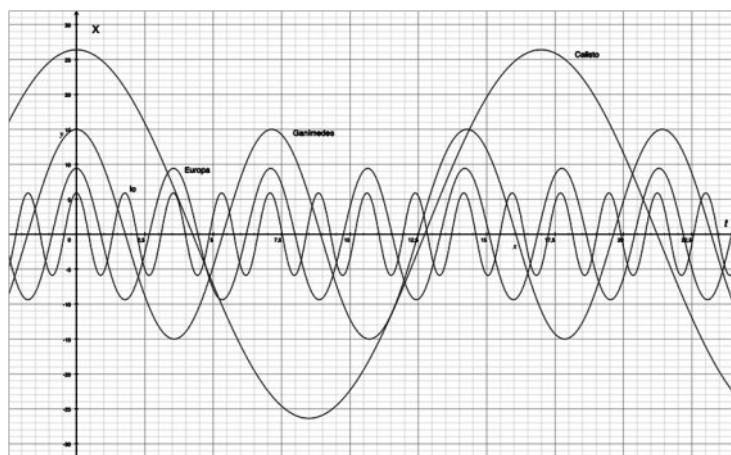


Fig. 8

En el eje de abscisas se representa la variable t , en unidades 'días', y en el eje de ordenadas la distancia x , que corresponde a la separación de cada satélite respecto al centro

de Júpiter en cada uno de los momentos en que se realiza una observación. El valor máximo de cada curva correspondería al radio orbital, (en unidades de radios de Júpiter, R_j), del satélite correspondiente.

De este análisis preparatorio se desprenden algunas recomendaciones a tener en cuenta en el desarrollo del trabajo de campo. A saber:

Conviene trabajar cada satélite por separado. Incluso, al tratarse de una experiencia con alumnos, cada grupo debería centrarse en una parte del problema, aunque las imágenes captadas sean la misma base de trabajo de todos los grupos/alumnos participantes en el proyecto.

Igualmente, este análisis revela la secuencia ideal de toma de imágenes que debería ajustarse a varias fotografías tomadas con intervalos de una hora por sesión, y durante 3 a 5 días mínimo para Ío y Europa. Mientras que para Ganimedes y Calisto podría ser suficiente una única foto/medida por sesión diaria durante un periodo de unos 20 días.

b) Medidas y resultados.

Si se tienen en cuenta las consideraciones anteriores, una posible simulación de medidas para Ganimedes podría ser del estilo de lo mostrado en la Figura 9, donde los datos son simulados y no tienen valor empírico, ya que sólo sirven en este caso para destacar una

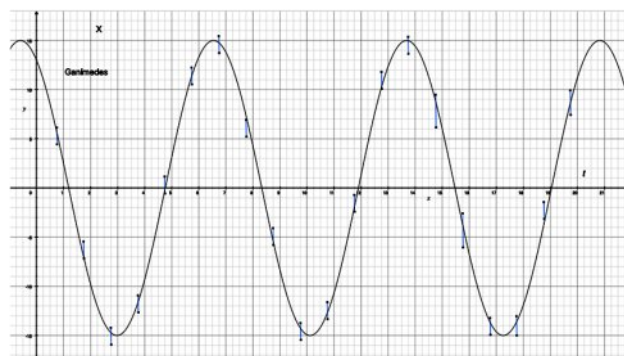


Fig. 9

metodología de trabajo. Se aprecia una supuesta medida por noche, en días consecutivos, más o menos a la misma hora, y con una estimación, (la que corresponda), de niveles de confianza en las medidas.

La curva superpuesta sólo aparece en la figura anterior como referencia visual. En realidad, ésta es la curva que debe calcularse a partir de los datos medidos. En ella, como se ve, se incorpora una fase ϕ que por simplicidad no se ha reflejado en la figura 8, y que los datos representados deben arrastrar necesariamente.

Después del trabajo de campo, sólo es necesario utilizar los datos para ajustar una curva del tipo

$$x(t) = R_{orb} \cos(\omega t + \phi)$$

igual que se hace para una recta en el caso de una función lineal o una parábola en una cuadrática, etc. De esta manera no es preciso asumir que la mayor elongación medida tenga que ser la que corresponde al radio orbital del satélite, ni tampoco es necesario forzar las sesiones de observación para acercarse lo más posible al momento temporal en que la elongación realmente es máxima.

c) Ajuste de la curva orbital

Ésta ya es la parte sencilla del trabajo. Para ello puede utilizarse cualquier herramienta software que incorpore esta funcionalidad. En este ejemplo se ha utilizado Mathematica (Wolfram). Se adjuntan las pocas líneas de código necesarias y los resultados obtenidos:

```
(* Importing Data... *)
data = Drop[Import[path <> file, "Data"], 1];
dim = Dimensions[data];
dia = data[[All, 1]];
elongacion = data[[All, 2]];
(* Model and Fit *)
```

```
XY1 = Transpose[{dia, elongacion}];
model1 = a * Cos[b * x + c];
fit1 = NonlinearModelFit[XY1, model1, {a, b, c}, x];
par1 = fit1[{"RSquared", "ParameterTable", "BestFit"}];
fit1 = fit1["BestFitParameters"];
```

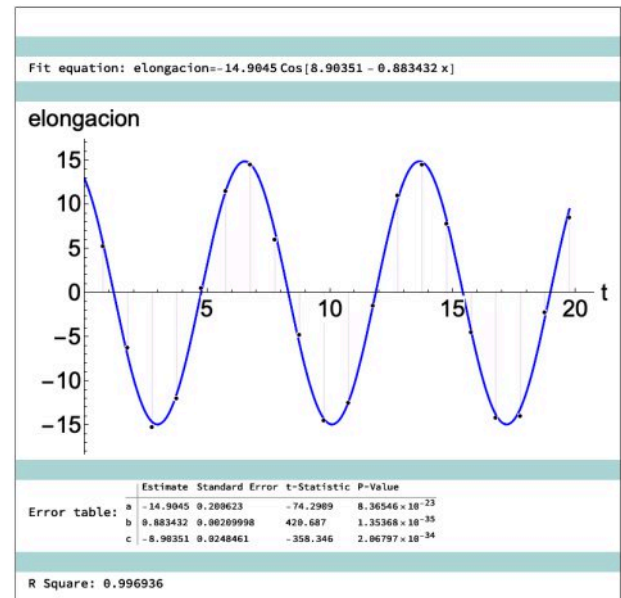


Fig. 10

El mejor ajuste del modelo,

$$y(x) = a \cos(bx + c)$$

equivalente al movimiento armónico simple, $x(t) = R_{orb} \cos(\omega t + \phi)$, considerado como el mejor enfoque posible según las condiciones del sistema [Júpiter, satélites] planteadas arroja los valores^[1]

$$\begin{aligned} a &\equiv R_{orb} = 14.90 \text{ (} R_j \text{)} \\ b &\equiv \omega = 0.88 \text{ (días}^{-1}\text{)} \\ c &\equiv \phi = -8.90 \text{ (rad)} \end{aligned}$$

El ajuste es muy bueno, $R^2=0.997$, así como las desviaciones típicas de los respectivos parámetros, pero esto aquí sólo indica que los valores simulados sobre los que se ha trabajado tienen poca dispersión. Lo normal es que con

[1] Debe tomarse el valor absoluto del dato que surge en el ajuste. El signo negativo aparece en consonancia con el signo de la fase ϕ , y pondría de manifiesto que la primera máxima elongación de los datos analizados se encuentra en parte izquierda del sistema de referencia, (de valores negativos).

valores a partir de medidas reales la situación sea también más realista. En cualquier caso, se insiste, lo que estamos discutiendo y proponiendo aquí es la metodología de trabajo.

La fase φ podemos ignorarla directamente, ya que sólo nos informa acerca de cómo se inserta nuestra fase de observación en el ciclo temporal natural del satélite en su baile orbital. Y sólo nos quedamos con

$$R_{orb} \text{ y } \omega = 2\pi/T$$

de donde obtenemos el valor del periodo:

$$T = 2\pi/\omega \simeq 7.14 \text{ días}$$

A partir de aquí ya puede seguirse con la línea argumental final y conclusiones del trabajo comentado.

4. Planificación de las observaciones

Debe insistirse en el estudio preliminar del escenario esperado, (el reflejado en la figura 8). A partir del mismo se deben considerar cuántas observaciones son posibles/deseables y la mejor secuencia de capturas en número, horas, días... que puedan ser compatibles con las condiciones inherentes a los observadores.

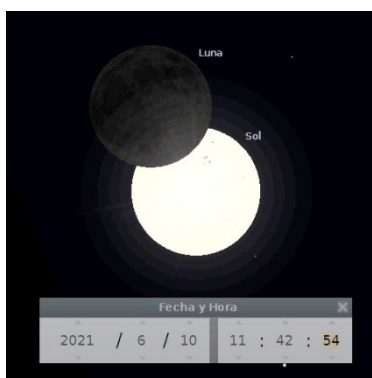
Igualmente debe tenerse claro que un número insuficiente de datos siempre es inversamente proporcional a la calidad de los resultados.

Joaquín Álvaro

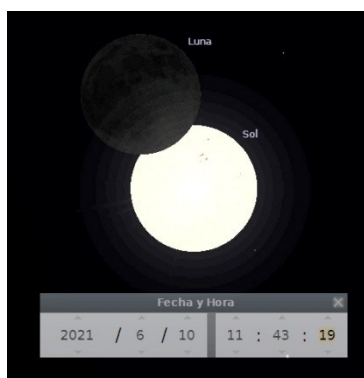
CONCURSO FOTOGRÁFICO ApEA DEL ECLIPSE PARCIAL DE SOL 10 JUNIO 2021



El 10 de junio de 2021 habrá un eclipse de Sol, que recorrerá la zona polar. Desde parte de Europa se podrá ver como eclipse parcial: el disco solar se verá ligeramente tapado por la Luna. Aunque el eclipse desde nuestras latitudes será pequeño, nos servirá como aperitivo de los eclipses totales que podremos ver desde España en 2026 y 2027.



Máximo desde Santiago



Máximo desde Madrid



Máximo desde Málaga

BASES DEL CONCURSO

Qué hay que hacer: Cada concursante deberá inscribirse en el formulario del Concurso que hay en la web de ApEA, subir una breve crónica escrita y un máximo de 5 fotos. En la crónica escrita se deben explicar las pruebas realizadas los días anteriores, la observación del eclipse, e incluirá las coordenadas del lugar de observación y las horas exactas de comienzo y del fin del eclipse en ese lugar.

Criterios: Se valorará la calidad del trabajo de campo realizado, la variedad de formas de observar el eclipse y la calidad de las fotos.

Premios: Habrá tres premios, que incluyen una suscripción digital por un año a la revista Astronomía y varios libros. Además, el primer clasificado recibirá unos prismáticos de uso astronómico.

Quiénes pueden participar: Alumnado de ESO, Bachillerato y Ciclos Formativos.

Fechas: Los concursantes pueden inscribirse y subir el material hasta el 20 de junio de 2021. El 30 de junio se publicarán los ganadores en la web de ApEA.

DATOS Y RECURSOS

ECLIPSE 10-6-2021

Lugar	Hora del Comienzo	Hora del Máximo	Hora del Fin	Magnitud Eclipse
Santiago	10:49:27	11:42:54	12:41:24	22,5%
Sevilla	10:57:32	11:33:05	12:10:56	8,6%
Madrid	11:00:54	11:43:19	12:28:52	11,9%
Bilbao	11:01:06	11:51:01	12:45:00	17,1%
Málaga	11:05:02	11:33:37	12:03:33	5,2%
Valencia	11:14:27	11:46:20	12:19:49	6,0%
Barcelona	11:19:37	11:55:21	12:32:58	7,2%

Página de eclipses de la NASA: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/solar.html>

Página tu tiempo: <https://www.tutiempo.net/eclipse-solar/espana/10-junio-2021.html>

Página del simulador Stellarium: <https://stellarium.org/es/>

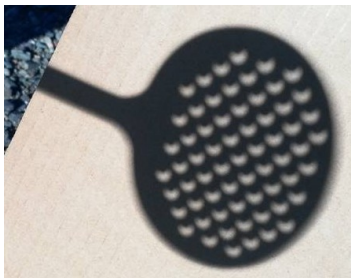
IDEAS PARA OBSERVAR EL ECLIPSE

Hay muchas formas de ver cualquier eclipse de sol, pero nunca se debe mirar directamente, pues se nos dañan los ojos, sino por proyección o usando filtros especiales. Aquí sugerimos varias formas seguras:

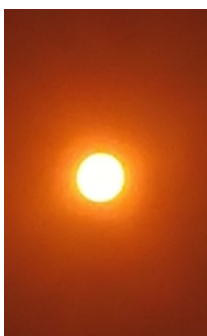
1. Ver la imagen proyectada del Sol tras pasar a través de un agujero: de una espumadera, de las hojas de los árboles en el suelo o en las paredes, o incluso son un agujero hecho con sus propias manos. Aunque es un sistema muy sencillo, en este eclipse, al ser tan pequeño, no será el mejor.
2. Mirar directamente con unas gafas para eclipse (no gafas de sol), o a través de un filtro solar del tipo de Baader Planetarium. No es un material caro, especialmente si se compra con tiempo.
3. Se puede fotografías con el móvil, con el máximo de zoom, poniendo delante del objetivo unas gafas de eclipse (no gafas de sol).
4. Con una cámara oscura hecha con un tubo o cartel enrollado, papel de aluminio agujereado y un papel de seda (o bolsa de plástico fina).
5. Proyectar la imagen con un pequeño espejo, situado a unos 50 m de una pared o pantalla. Produce una imagen del Sol de unos 50 cm de diámetro. La nitidez de la imagen mejora si se pone delante del espejo una cartulina con un orificio de pocos cm (unos 4 cm de diámetro es buen compromiso entre nitidez y brillo).
6. Por proyección en una pared o pantalla, usando unos prismáticos y tapando uno de los anteojos.
7. Por proyección en una pantalla, con un telescopio.
8. Mirando directamente con un telescopio que tenga un filtro solar en el objetivo.
9. Con un "Solarscope".



1



2



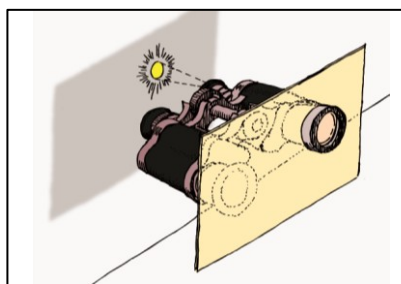
3



4



5



6



7



8



9

No se debe observar el Sol directamente, sin la protección adecuada. Puede producir daños permanentes en la visión.

Organiza



Patrocina

ASTRONOMÍA



ApEA, la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía, nació en 1995 para acoger a todas las personas que se dedican a la enseñanza de la Astronomía en centros educativos, planetarios, museos de la ciencia, agrupaciones de aficionados y clubes de estudiantes.

ApEA engloba a todos los interesados en la enseñanza de todos los niveles educativos reglados -desde la enseñanza primaria hasta la universitaria- así como los no reglados.

También organiza reuniones de formación para sus socios y publica materiales de interés didáctico, como la presente revista.

Más información en www.apea.es

