

revista **NaDiR**

Nº 44 I-2021

**ESTUDIO DEL MOVIMIENTO
DE UNA EYECCIÓN DE
MASA CORONAL**

**ENSEÑANDO FÍSICA ON
LINE CON EL SOL**

**ESTIMACIÓN DE LA
DISTANCIA DE LA TIERRA
AL SOL**

**¿HASTA CUÁNDO VA A
BRILLAR EL SOL?**

**FOTOGRAFÍAS DE LA GRAN
CONJUNCIÓN**



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



**ASOCIACIÓN
PARA LA ENSEÑANZA
DE LA ASTRONOMÍA**

www.apea.es

ApEA

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

Enero 2021

Foto de portada:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/Categor%C3%ADa:Sun>

SUMARIO

EXPERIENCIAS

ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE UNA EYECCIÓN DE MASA CORONAL

Anicet Cosialls

3

MATERIALES

ENSEÑANDO FÍSICA ON LINE CON EL SOL

Ricardo Moreno

9

ACTIVIDADES

ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA DE LA TIERRA AL SOL

Anicet Cosialls

13

DIDÁCTICA

¿HASTA CUÁNDO VA A BRILLAR EL SOL?

Anicet Cosialls

20

FOTOGRAFÍAS DE LA GRAN CONJUNCIÓN

Socios de ApEA

25

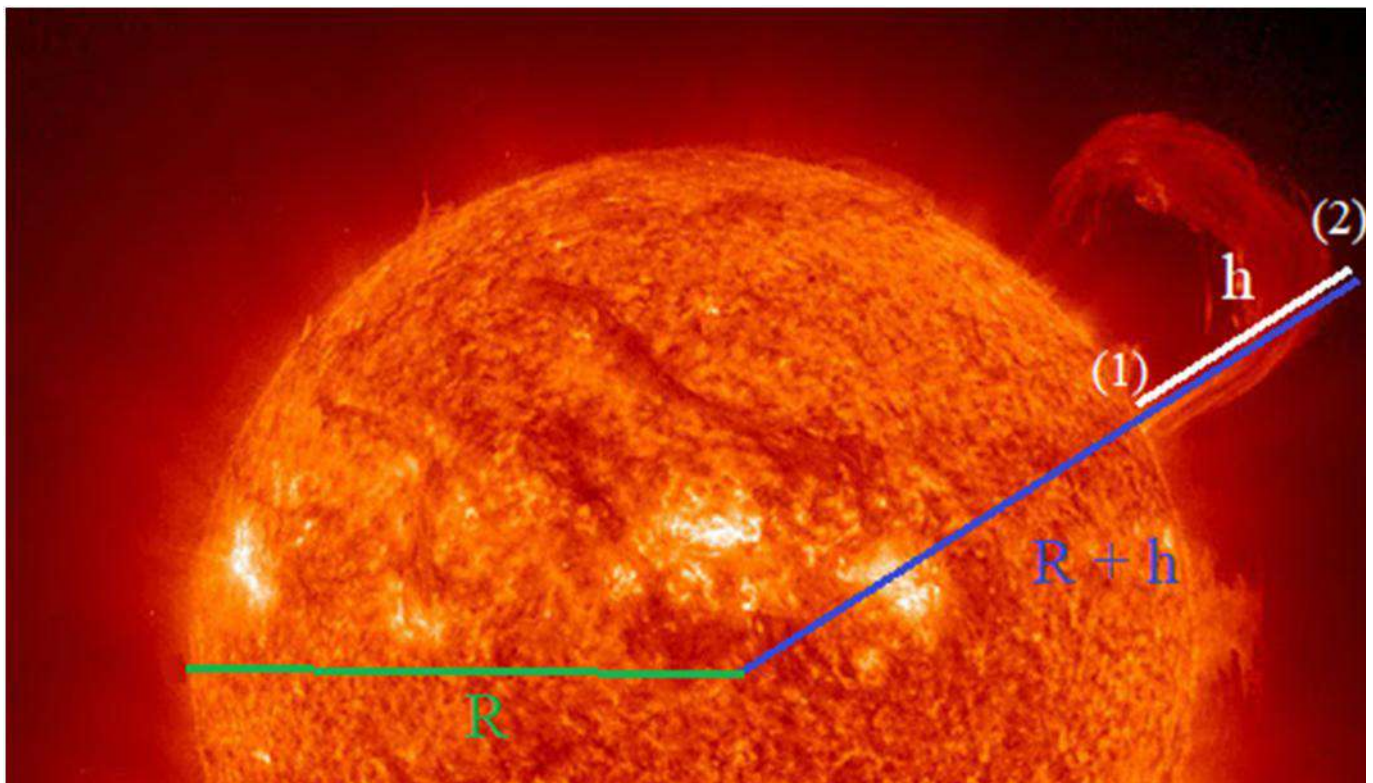
Nadir no se hace responsable de las opiniones expresadas en los artículos. Si no se indica otra cosa, las imágenes son propiedad de los autores de los artículos.

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.

ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE UNA EYECCIÓN DE MASA CORONAL

Anicet Cosialls Manonelles, Institut Guindàvols, anicetc@gmail.com



En este artículo se proponen dos métodos sencillos para hacer una estimación de la velocidad de eyección de la masa coronal, que pueden usarse como prácticas rutinarias de física aplicada con alumnado de bachillerato. Se usan imágenes del satélite SOHO, y el programa gratuito Tracker.

Al mirar el Sol con un telescopio que tenga un filtro H-alfa, se puede ver su cromosfera. En ella suelen observarse las fulguraciones solares, que son filamentos de materia solar, proyectada por encima de su superficie debido a la intensa actividad del Sol. Las fulguraciones que alcanzan las zonas más altas se llaman protuberancias y pueden llegar a lanzarse al espacio en forma de viento solar. Cuando eso ocurre, se les llama

eyecciones de masa coronal (CME en sus siglas en inglés). Este suceso ocurre en la corona del Sol.

Cuando el Sol eyecta masa coronal, una gran cantidad de plasma denso y frío o de gas ionizado es expulsada a alta velocidad, desafiando la enorme gravedad y viaja por el espacio interplanetario hasta alcanzar la Tierra.

En el momento en que las erupciones solares interceptan el campo magnético de la Tierra, se producen tormentas geomagnéticas, que pueden producir daños en los sistemas electrónicos de los satélites, interfiriendo las comunicaciones, los sistemas de navegación, e incluso las redes eléctricas. Representan un riesgo para los astronautas de la ISS, y también lo será para los cosmonautas del futuro, que viajarán a la Luna o a Marte.

Para minimizar los riesgos es necesario un sistema de alertas que detecte las ECMs, y que pueda pronosticar el tiempo de llegada a la Tierra. Esto se consigue con un instrumento del satélite SOHO: el coronógrafo espectrométrico LASCO C2, que permite determinar la velocidad de propagación de las eyecciones, su dirección y extensión. Para ello, en intervalos regulares de tiempo, captura imágenes de la corona solar y detecta la evolución del movimiento de las EMCs.

En este artículo se proponen dos métodos sencillos para hacer una estimación de la velocidad de eyección de la masa coronal, que pueden usarse como prácticas rutinarias de física aplicada con alumnado de bachillerato.

Objetivos

Empezaremos observando y fotografiando la cromosfera solar a través de un telescopio solar con filtro H-alfa, intentando detectar alguna protuberancia. Esto servirá para acercar el tema, pero no es estrictamente necesario, pues para los cálculos usaremos las imágenes tomadas por el coronógrafo LASCO C2 del SOHO, disponibles en su página web.

Haremos un estudio cinemático de la evolución de una erupción solar, y estimaremos la velocidad inicial de la ECM.

Compararemos la velocidad de las ECMs con la velocidad de escape del Sol, e intentaremos prever si alcanzarán la Tierra.

Observación de la cromosfera solar

El material necesario sería:

Telescopio solar: Lunt Solar Systems LS60T H α de 60 mm (Imagen 1).

Cámara réflex Canon EOS 4000D con adaptador al foco primario del telescopio (Imagen 2).



Imagen 1. Telescopio solar con filtro H-alfa



Imagen 2. Cámara acoplada al telescopio solar

En nuestro caso, la observación se hizo el 14 de noviembre de 2010 a las 10:00 UT desde el instituto Maria Rúbies de Lleida. Tuvimos mala suerte, porque en la observación visual no se apreció ninguna fulguración, y tampoco la hubo en la imagen del día del SOHO. En la foto de la cromosfera del Sol (Imagen 4), realizada por la

alumna Belén Vicente, no se observa indicio alguno de fulguraciones. La actividad solar de aquel día fue mínima, sin ninguna mancha solar en la fotosfera.



Imagen 3. Cromosfera solar. No se observan fulguraciones

Cálculo de la velocidad de una ECM. Método 1.

El campo gravitatorio es un campo de fuerzas conservativo, con lo cual la energía mecánica de un cuerpo de masa m que evolucione en el seno de dicho campo se conserva.

Apliquemos el principio de conservación de la energía al estudio de un filamento de materia solar proyectada por encima de su superficie.

La pregunta que nos planteamos es: ¿a qué velocidad v_1 sale proyectada la masa coronal de la superficie del Sol?

Para contestar a la pregunta, partimos como datos de la masa M del Sol, de su radio R y de la constante de gravitación Universal G . Supondremos que la velocidad final v_2 de la masa m eyectada en el punto más alto h es cero (Imagen 4).

Si aplicamos el principio de conservación de la energía en los dos puntos (1) y (2):

$$E_1 = E_2 \rightarrow$$

$$\begin{aligned} &\text{Energía cinética (1) + Energía potencial (1)} \\ &= \text{Energía cinética (2) + Energía potencial (2)} \end{aligned}$$

$$\frac{mv_1^2}{2} - \frac{GMm}{R} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{GMm}{R+h}$$

Podemos eliminar la masa m , que está en todos los términos. Si tenemos en cuenta que $v_2 = 0$, podemos despejar la velocidad v_1 de la masa eyectada:

$$v_1 = \sqrt{2GM \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h} \right]} \quad \text{Fórmula (1)}$$

Conociendo la distancia h , podemos saber la velocidad con la que es eyectada la masa.

Toma de datos

Usaremos la foto de una fulguración solar (archivo [superprom.jpg](#))^[1] (Imagen 4), y el programa informático gratuito Tracker^[2]. Al final del artículo hay un breve tutorial sobre el manejo del programa.

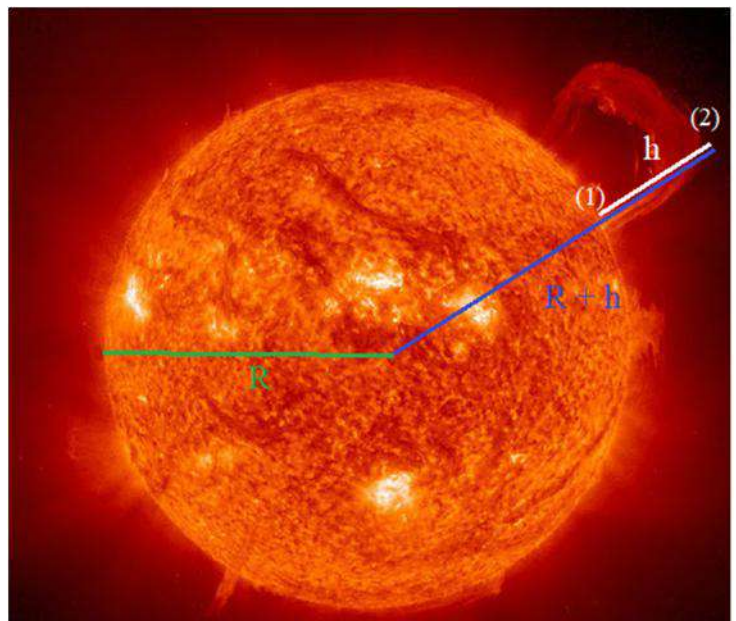


Imagen 4. Prominencia solar en forma de mango (14/09/1999). Descripción gráfica de un filamento solar de altura h . "Cortesía del consorcio SOHO/EIT"

Por facilidad, hemos medido $R+h$, o sea, la distancia desde el punto más alto de la llamarada solar hasta el centro del Sol (Imagen 4). Para ello utilizamos la herramienta "Vara de calibración" y la "Cinta métrica" del programa (Imagen 5). Y calculamos la velocidad inicial de la ECM aplicando la Fórmula (1).

Resultados obtenidos. Análisis y discusión.

Una primera medida nos da $R+h=1,07 \cdot 10^9$. Si aplicamos la fórmula (1):

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,99 \cdot 10^{30} \cdot \left[\frac{1}{6,96 \cdot 10^8} - \frac{1}{1,50 \cdot 10^{11}} \right]} = 616 \text{ km/s}$$

Si comparamos este valor con la velocidad de escape v_e :

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,99 \cdot 10^{30}}{6,96 \cdot 10^8}} = 618 \text{ km/s}$$

v_1 es inferior a la velocidad de escape del Sol, lo que justifica que la longitud del filamento sea finita.

Cuanto mayor sea la velocidad inicial de las eyecciones, mayor será la altura alcanzada, y mayor será el riesgo de que intercepten la órbita de la Tierra. Conociendo la distancia del Sol a la Tierra, $1 \text{ UA} = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$, vamos a hacer una estimación de la velocidad mínima de las eyecciones para que lleguen a la Tierra. No tendremos en cuenta la influencia gravitatoria de los planetas y demás cuerpos celestes del sistema solar. Aplicamos la Fórmula 1 al caso de $R+h = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$

Cuando la velocidad inicial de una CME alcance ese valor (es casi la velocidad de escape del Sol), llegará a la Tierra. La velocidad más alta medida entre 1996 y 2012, fue de $3264 \text{ km/s}^{[5]}$, valor muy superior a la velocidad de escape y alcanzó la Tierra en 12,76 h.

Cálculo de la velocidad inicial de una ECM. Método 2

El método consiste^[3] en hacer un seguimiento temporal y un estudio cinemático del movimiento de la masa coronal de una eyección. Para ello utilizamos sucesivos fotogramas del GIF animado de la CME del día 15/03/2013, entre las 7:12 y las 7:48 UT, confeccionado con imágenes del coronógrafo LASCO C2 del SOHO. El análisis se realiza también con el programa Tracker.

Se abre el archivo GIF con el programa Tracker, y con la Vara de calibración se le asigna el valor de $1,393 \cdot 10^9 \text{ m}$ al diámetro del Sol. Con la "Cinta de medir" se determina la posición del frente de onda de la CME respecto al centro del Sol en los sucesivos fotogramas (Imagen 5). Se anotan los tiempos transcurridos entre fotograma y fotograma y se construye la tabla de datos distancia-tiempo (Imagen 6).

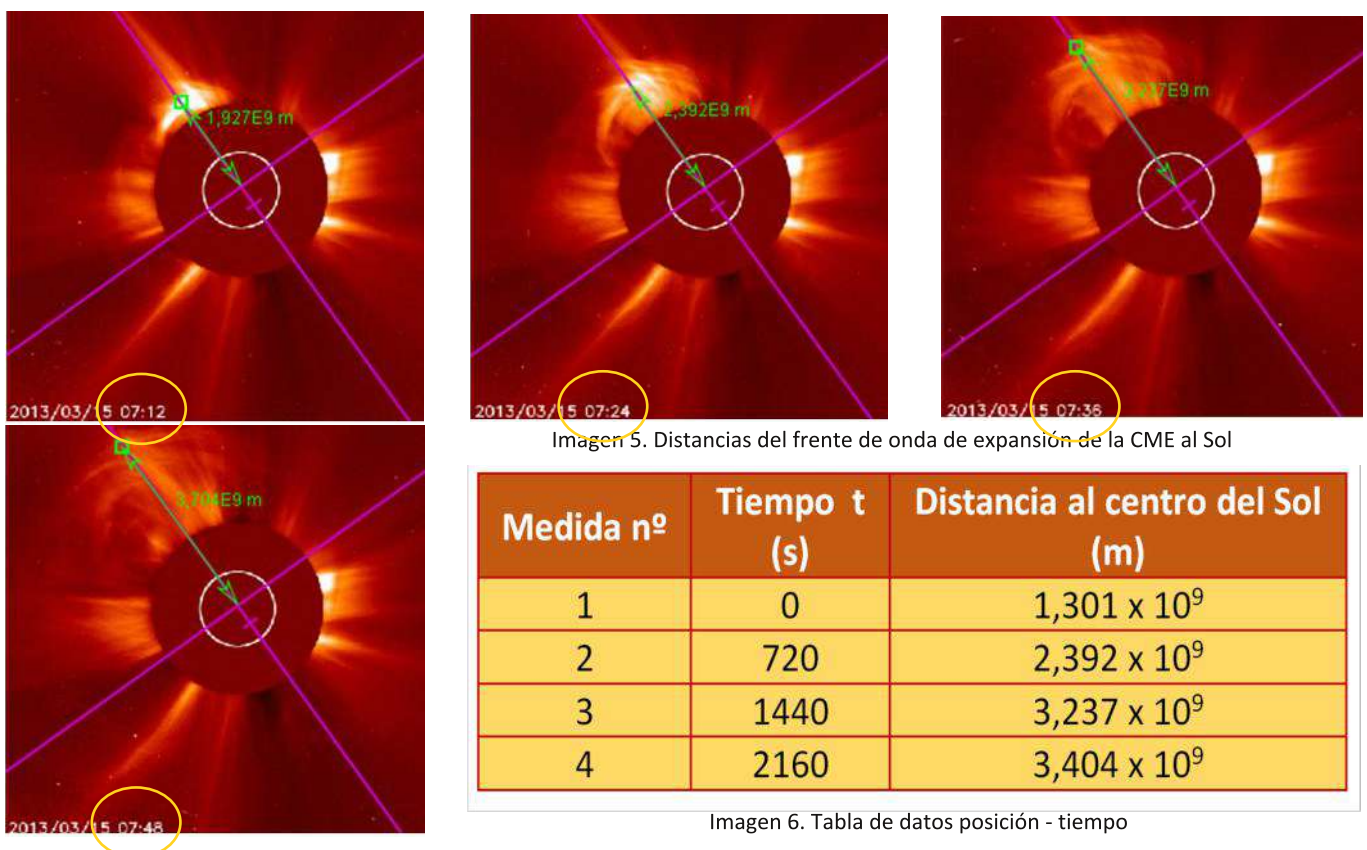


Imagen 5. Distancias del frente de onda de expansión de la CME al Sol

Medida nº	Tiempo t (s)	Distancia al centro del Sol (m)
1	0	$1,301 \times 10^9$
2	720	$2,392 \times 10^9$
3	1440	$3,237 \times 10^9$
4	2160	$3,404 \times 10^9$

Imagen 6. Tabla de datos posición - tiempo

Análisis de los resultados

Representamos los datos en un gráfico $x-t$ (Imagen 7) con el programa CurveExpert^[6] y los ajustamos a una línea recta, al disponer de pocos datos:

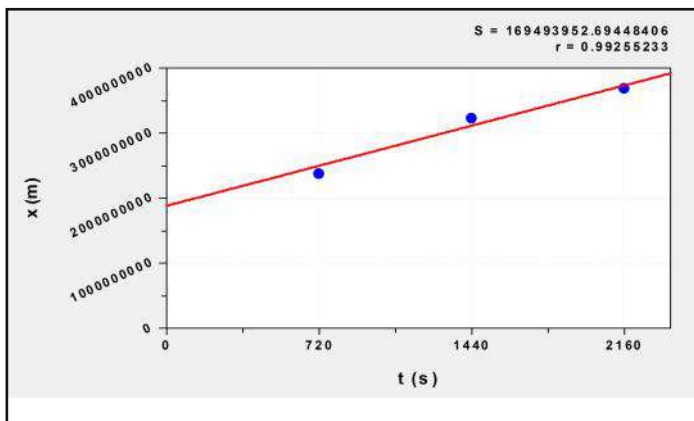


Imagen 7. Gráfico posición -tiempo

Ajuste lineal: $y = a+bx$
 $a = 1.8886 \text{ E+9 m}$
 $b = 8.58 \text{ E+5 m/s}$

Se ve que el movimiento de la CME a distancias cercanas al Sol se puede asimilar a un movimiento uniforme con una velocidad media (pendiente de la recta) de 858 km/s, velocidad superior a la de escape. Dependiendo de su orientación, llegará o no a la magnetosfera terrestre, provocando en tal caso auroras boreales y tormentas geomagnéticas.

Se han analizado otros videoclips, y en todos se han encontrado velocidades medias superiores a los 700 km/s.

Cabría esperar, en caso de disponer de medidas más espaciadas en el tiempo, que el movimiento de expansión fuese desacelerado, pues la fuerza de la gravedad del Sol frenaría las

CMEs, pero no se ha encontrado ningún gif animado adecuado para comprobarlo.

Referencias

1. Protuberancia solar. Consultado el 17/12/2020. Disponible en:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fsoho.nascom.nasa.gov%2Fgallery%2Fimages%2Fsuperprom.html&psig=AOvVaw1gcEC2W7G6Wbe39-erXnWw&ust=1608571957439000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCMirjNOL3e0CFQAAAAAdAAAAABAD>

2. Programa Tracker video analysis and modeling tool. Consultado el 17/12/2020. Disponible en:

<https://physlets.org/tracker/>

3. Medición del movimiento de una eyección de masa coronal. Consultado el 17/12/2020. Disponible en:

<https://pwg.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/cmeposter/spmeasure.html>

4. GiF animado de una CME. Consultado el 17/12/2020. Disponible en:

https://earthsky.org/upl/2013/03/m1cme_anim.gif

5. Guerrero Vásques Maribel S. 2014. Eyecciones coronales de masa solar a una unidad astronómica. Consultado el 17/12/2010. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/301610427_Eyecciones_coronales_de_masa_solar_a_una_unidad_astronomica

6. CurveExpert. Consultado el 7/12/2020. Disponible en:

<https://es.freownloadmanager.org/Windows-PC/CurveExpert.html>

Mini tutorial del programa Tracker en la página siguiente ->

Cómo medir distancias con el programa Tracker

1. Con el programa Tracker se abre el archivo superprom.jpg^[1]. Posteriormente se clicca en el icono “Sistema de coordenadas”, y se sitúa el origen en el centro del Sol (ver Imagen 8).

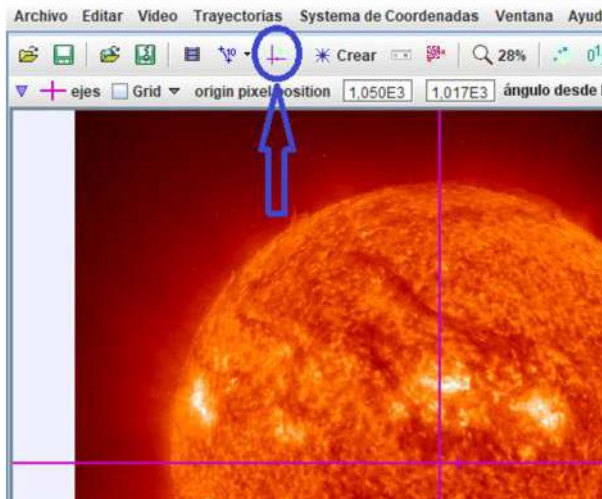


Imagen 8. Sistema de referencia situado en el centro del Sol

2. Se Clicka en “Vara de Calibración” (Imagen 9).

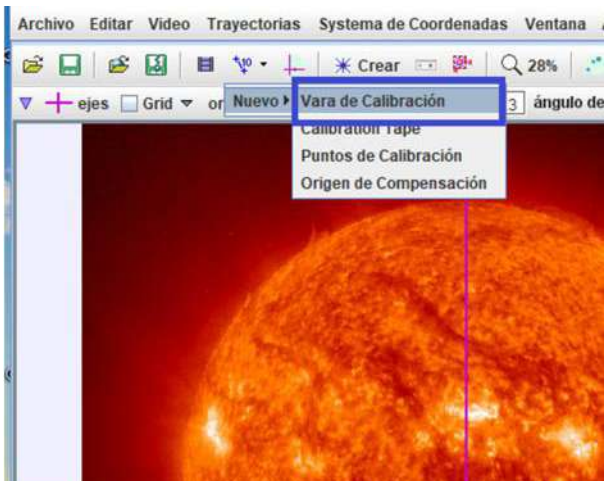


Imagen 9. Icono de la vara de calibración

3. Manteniendo pulsado SHIFT, con el ratón se clicca en el inicio y en el final del diámetro del Sol. Se introduce a continuación el valor numérico de la distancia y la unidad: 1,393E9 m (Imagen 10).

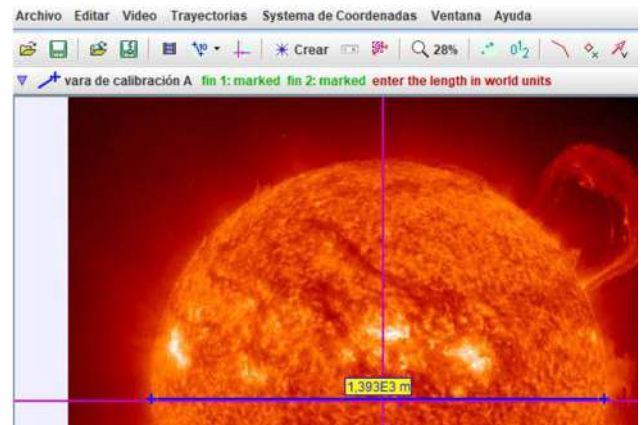


Imagen 10. Calibración de la “Vara de Medir”. Se le asigna al diámetro de la circunferencia el valor de 1,393E9 m

4. Se clicca en “Cinta Métrica” (Crear/Herramientas de Medida/Cinta Métrica) (Imagen 11).

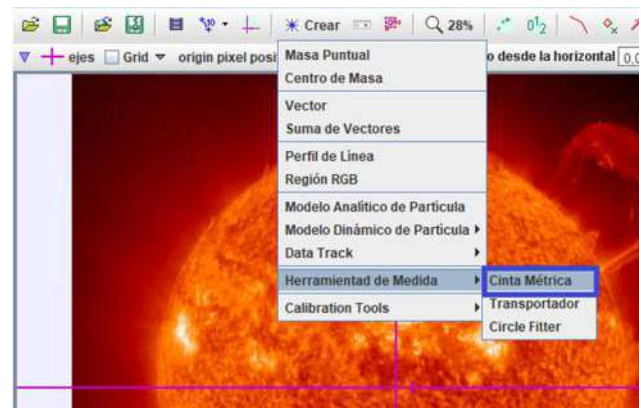


Imagen 11. Cinta Métrica

5. Se clicca en “Cinta Métrica”. Manteniendo pulsado SHIFT, con el ratón se clicca en el centro del Sol y en la parte más alta de la protuberancia. La longitud entre estos dos puntos aparece marcada encima del segmento (color verde). Se puede seleccionar el color de la cinta si se clicca en “Cinta” (Imagen 12).

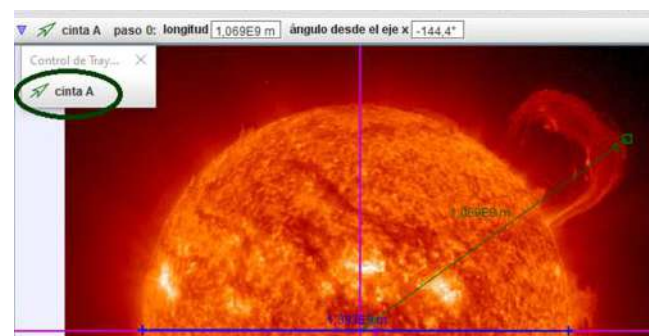
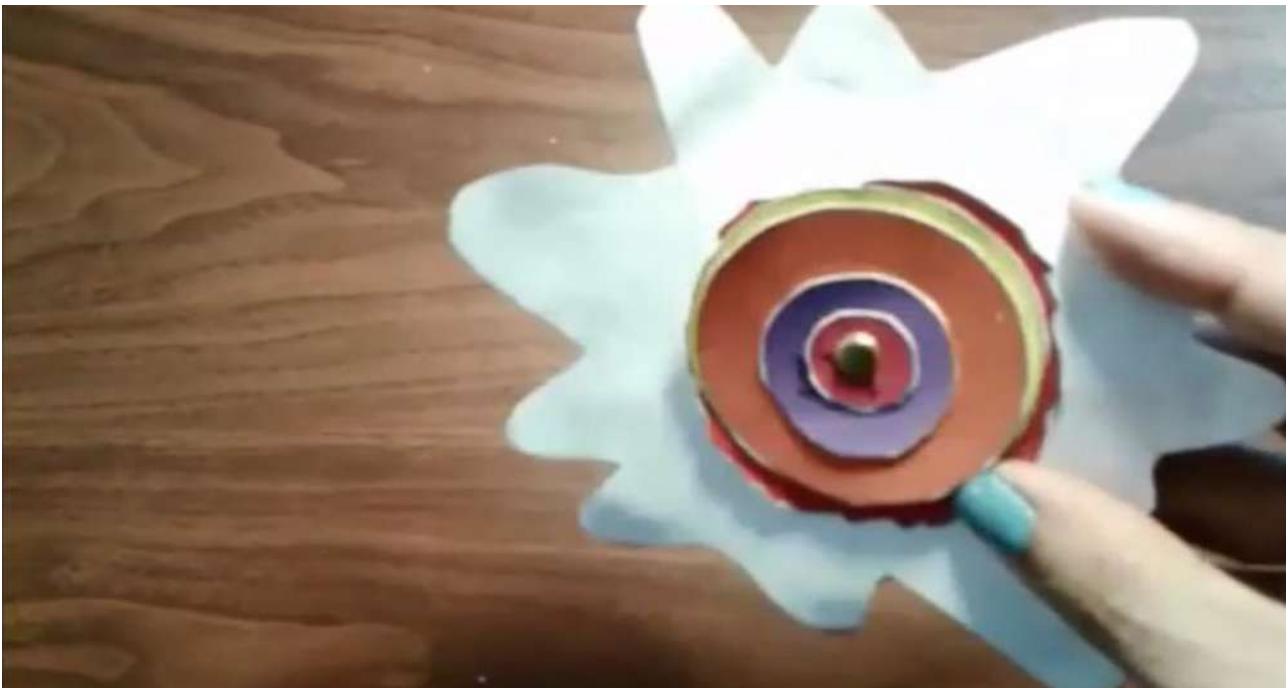


Imagen 12. Medida de la distancia de la protuberancia al centro del Sol

ENSEÑANDO FÍSICA ON LINE CON EL SOL

Ricardo Moreno Luquero



Los videos de NASE on line, están pensadas para los propio cursos de Nase, pero pueden ser una ayuda para la enseñanza en cualquier ámbito. En este artículo se explican los videos que hay en el Taller 5 sobre el Sol, en el que las actividades pueden servir en la enseñanza de la Física, en especial en las clases on line. Son videos cortos y sin sonido, que muestran los conceptos y explicaciones que están en el libro "*14 pasos hacia el Universo*".

El Taller 5 trata sobre el Sol: su estructura, las manchas solares, cómo genera la luz y energía que nos transmite, y se detiene estudiando diversas cuestiones del espectro solar, desde sus longitudes de onda hasta las modificaciones que sufre al entrara en nuestra atmósfera, como es la polarización y el scattering.

En la **Actividad 1** se habla de la polarización de parte de la luz que nos llega

desde el Sol. En un [primer video](#) se explica qué son los filtros polarizadores, y cómo se pueden conseguir con algunas gafas de sol o con las gafas del cine 3D. En un [segundo video](#) se usan esos filtros polarizadores con la luz reflejada en ventanas, cuadros, suelos y salpicaderos del coche. Hay un [tercer video](#) y un [cuarto video](#) y hasta un [quinto video](#) que usan la luz polarizada de las pantallas de ordenadores portátiles con plásticos y papel adhesivo.

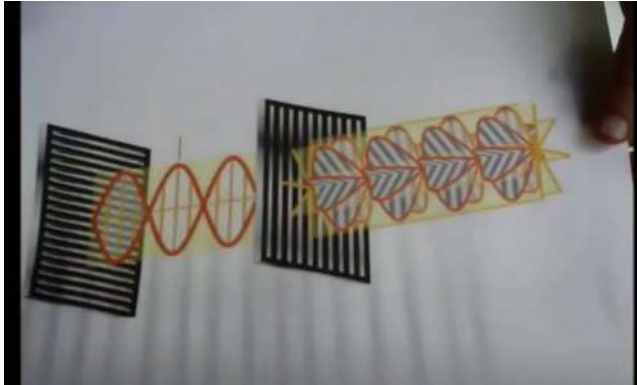


Fig. 1 Modelo de filtros polarizadores



Fig. 4 Luz polarizada en los reflejos en el interior del coche



Fig. 2 Luz polarizada en el cielo

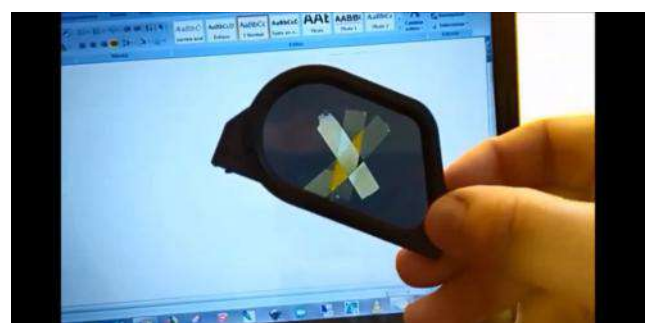


Fig. 5 Luz polarizada de una pantalla de ordenador, con varias capas de cinta adhesiva

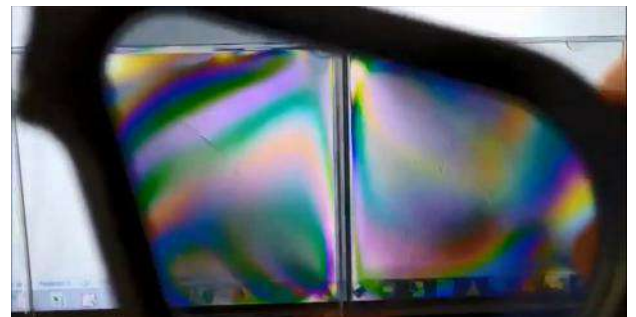


Fig. 6 Luz polarizada atravesando plástico, desvela tensiones interiores y puntos débiles

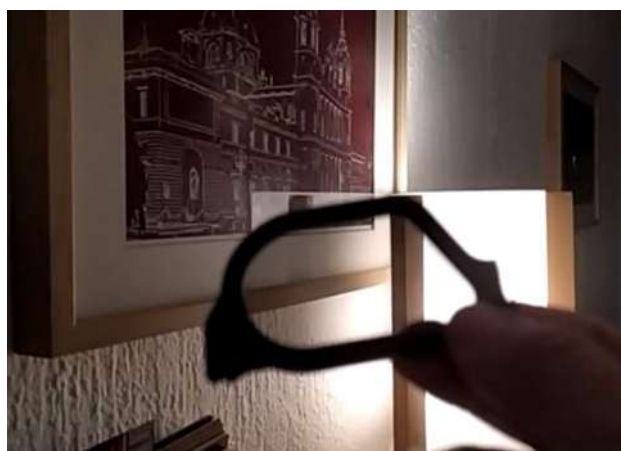


Fig. 3 Luz polarizada en los reflejos

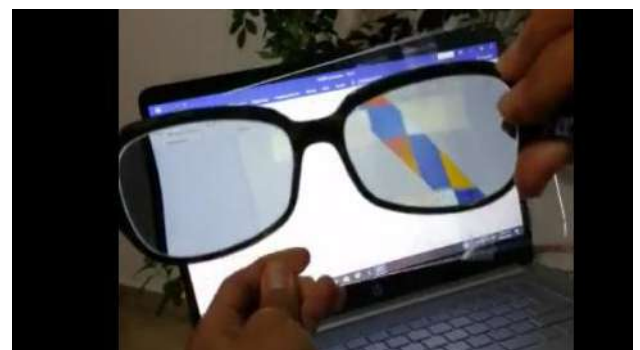


Fig. 7 Algunas gafas de sol son polarizadas

La **Actividad 2** consiste en un modelo para niños pequeños de las partes del Sol, que se ve en este [video](#).



Fig. 8 Modelo con las capas del interior del Sol

En la **Actividad 3** se describe cómo seguir las manchas solares, y cómo calcular el periodo de rotación solar con ellas. Se hace en este [video](#).

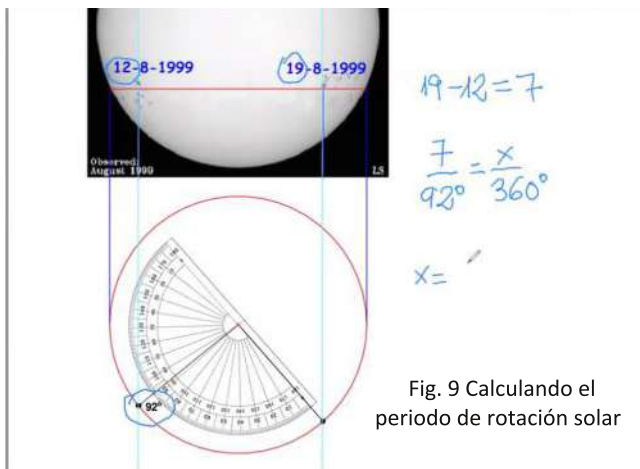


Fig. 9 Calculando el periodo de rotación solar



Fig. 10 Fotómetro de mancha de aceite

La **Actividad 4** trata de la determinación de la potencia del Sol, usando un fotómetro de mancha de aceite. En un [primer video](#) se aprende a usarlo, comparando la iluminación que llega a la mancha desde dos bombillas de potencia diferente, para comprobar la ley del

cuadrado de la distancia. Después se compara la iluminación de una bombilla con la que llega del Sol.



Fig. 11 Comparando una bombilla con el Sol

También se puede hacer con la mejilla de la cara, como se ve en este [otro video](#).



Fig. 12 Calculando la potencia del Sol con la mejilla

En el curso se habla de la opacidad del interior del Sol, y de la transparencia de sus fotosfera, y en [el video](#) de la **Actividad 5** se muestra, con la llama de una vela, la diferencia entre transparencia y opacidad.



Fig. 13 Diferencia entre transparencia y opacidad

Por último, en la **Actividad 6** se ve la mayor facilidad de dispersión de los fotones azules, que hace que el cielo de día sea azul, y los

atardeceres rojos. En este [video](#) se muestra con una linterna de móvil y un vaso con agua y unas gotas de leche.



Fig. 14 Los fotones azules de la luz blanca de un móvil se dispersan con facilidad



Fig. 15 La luz que sale por los lados es azulada. Por eso el cielo de día es azul



Fig. 16 Al faltar los fotones azules, la luz blanca se vuelve amarillenta, como en los atardeceres

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/



ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA DE LA TIERRA AL SOL

Anicet Cosialls Manonelles, Institut Guindàvols, anicetc@gmail.com



Determinar una magnitud astronómica con medidas tomadas por uno mismo, de una manera sencilla y utilizando materiales que estén al alcance de todos es una buena actividad con alumnos. La sencillez lleva incluida basarnos en otra magnitud conocida. En este artículo proponemos un método que utilizamos con el alumnado de ESO y Bachillerato para hacer una estimación experimental de la distancia de la Tierra al Sol, conociendo el radio de nuestra estrella.

1. Introducción

El conocimiento que tenemos del universo se ha ido construyendo gracias a las aportaciones científicas de multitud astrónomos, que a partir de observaciones, y de recogida de datos, elaboraron las leyes que rigen el movimiento de

los cuerpos celestes. Conocer el universo es conocer sus medidas, tarea nada fácil que se ha llevado adelante a lo largo de la historia con la ayuda de los datos numéricos experimentales obtenidos, y la aplicación de cálculos matemáticos.

La determinación de magnitudes astronómicas, iniciada por Eratóstenes en el s. III a. C. con la medida del radio de la Tierra, ha sido siempre uno de los grandes retos de los astrónomos. Dicho objetivo sigue vigente en la actualidad, ya que cada día se descubre un exoplaneta, el cual hay que caracterizar, determinando sus parámetros astronómicos: masa, radio, distancia a la estrella, velocidad orbital, etc.

Quizá la constante astronómica más fundamental sea el radio medio de la órbita de la Tierra alrededor del Sol: la Unidad Astronómica (UA). La importancia de esta determinación radica en que es la llave que abre las puertas del cosmos. Dicha distancia, no es sólo una medida del Sistema Solar, sino que también lo es del espacio: apoyándonos en su valor, determinamos la distancia a las estrellas por paralaje, y también se pueden medir propiedades astrofísicas de planetas y estrellas. A título de ejemplo, la tercera ley de Kepler permite la determinación de la masa del Sol, tan solo conociendo el valor de la Unidad Astronómica, el periodo de traslación de la Tierra, y la constante de gravitación universal.

Medir la distancia de la Tierra al Sol ha sido un cometido difícil que se ha intentado resolver con mayor o menor éxito durante más de 2000 años utilizando diferentes métodos^[1].

Aristarco de Samos (siglo II a. C) fue el primero en obtener una medida relativa de dicha distancia, aunque su valor estaba mucho del que hoy en día conocemos debido a la precariedad de los instrumentos que utilizó. La distancia Tierra-Sol no se logró medir con valores semejantes a los actuales, hasta mediados del siglo XVII por Cassini y Richer.

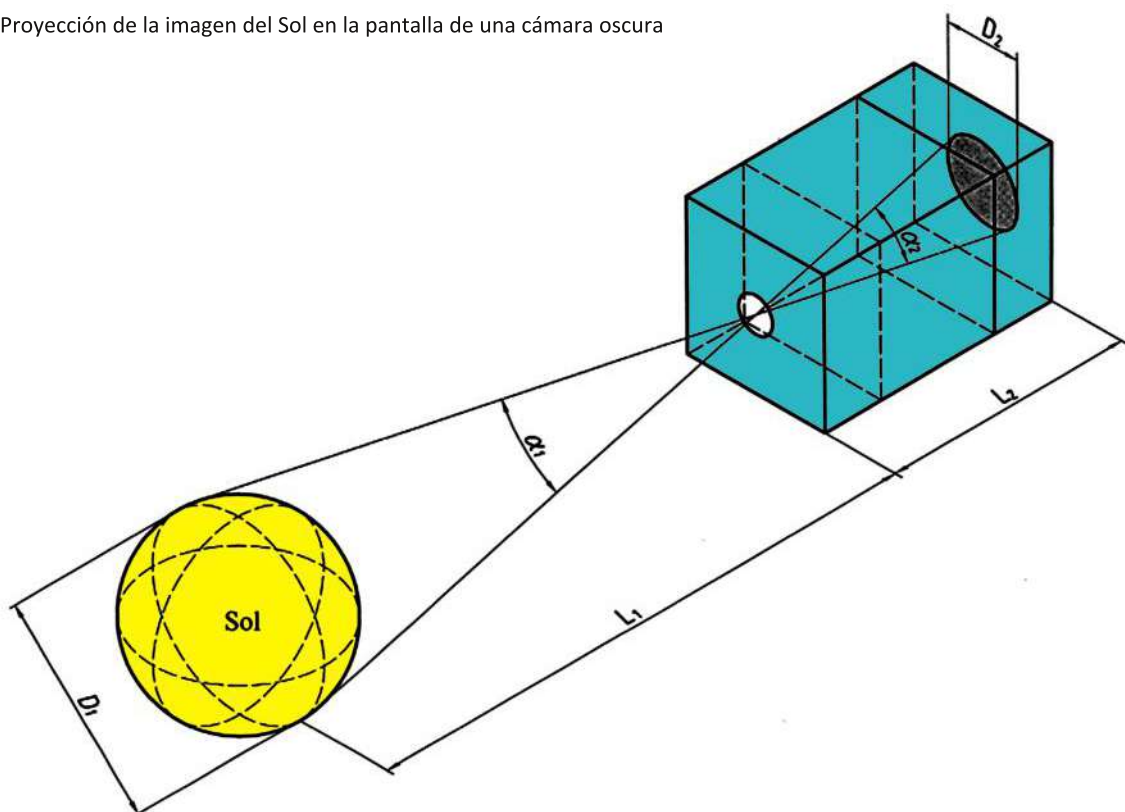
2. Diseño experimental

Se proyectará la imagen del Sol sobre la pantalla de una cámara oscura de longitud variable conocida (L_2) (Fig. 1), y se medirá el tamaño de la imagen (D_2). Como los ángulos α_1 y α_2 son iguales, se puede aplicar el teorema de Tales:

$$\frac{D_1}{L_1} = \frac{D_2}{L_2} \rightarrow \boxed{L_1 = \frac{L_2 \times D_1}{D_2}}$$

Y si se conoce el valor del diámetro del Sol (D_1), se puede calcular la distancia Tierra-Sol (L_1).

Fig. 1: Proyección de la imagen del Sol en la pantalla de una cámara oscura



Los materiales que necesitamos son

Cartulina negra

1 hoja de papel semitransparente (vegetal o papel de seda)

Regla

Tijeras

Compás

Trípode/soporte

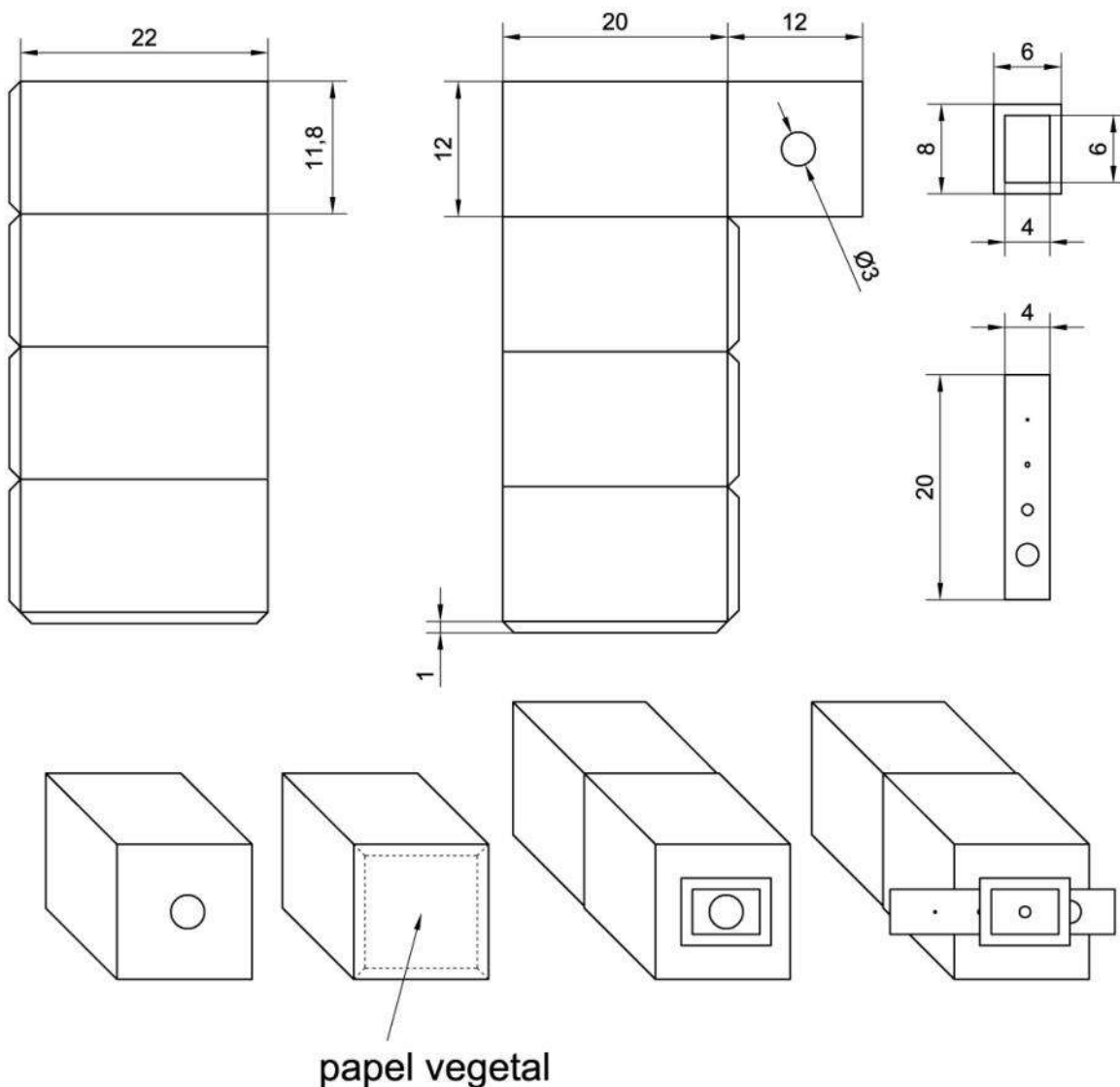
Pie de rey (con precisión de 0,1 mm)

Cinta métrica (con precisión 1 mm)

Cinta adhesiva

Construimos la cámara oscura (Fig. 2, 3, 4, 5, y 6). Consiste en dos cajas, una se inserta en la otra, similar pero algo más ancha, de tal forma que deslizando una entre la otra, se obtiene una longitud total variable. En un extremo hay una pantalla de papel semitransparente (papel cebolla o de seda). En el otro extremo hay un orificio de 3 mm de diámetro. Delante de él se puede deslizar una cartulina con orificios de distintos diámetros (todos menores de 3 mm, los dos más pequeños hechos con la punta de una chincheta y con un alfiler). Así tenemos una cámara oscura de longitud variable y de varios diafragmas.

Fig. 2: Planos con las medidas para construir la cámara oscura



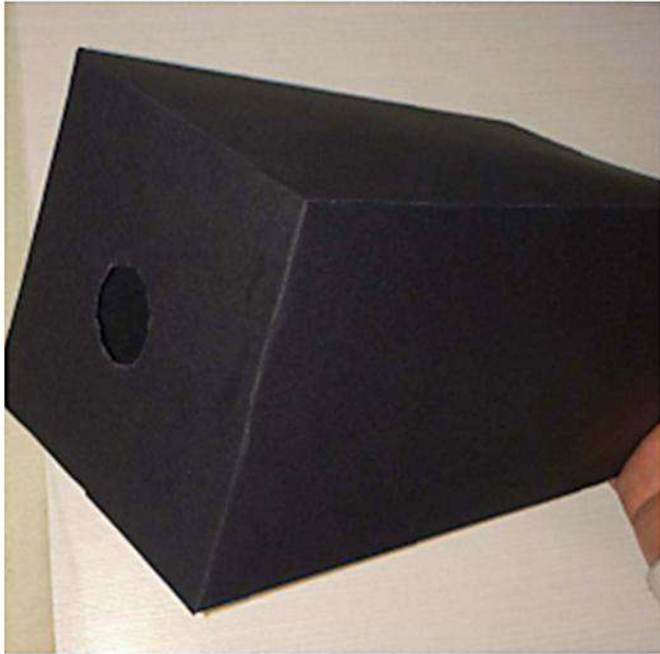


Fig. 3: Montaje de la caja 1

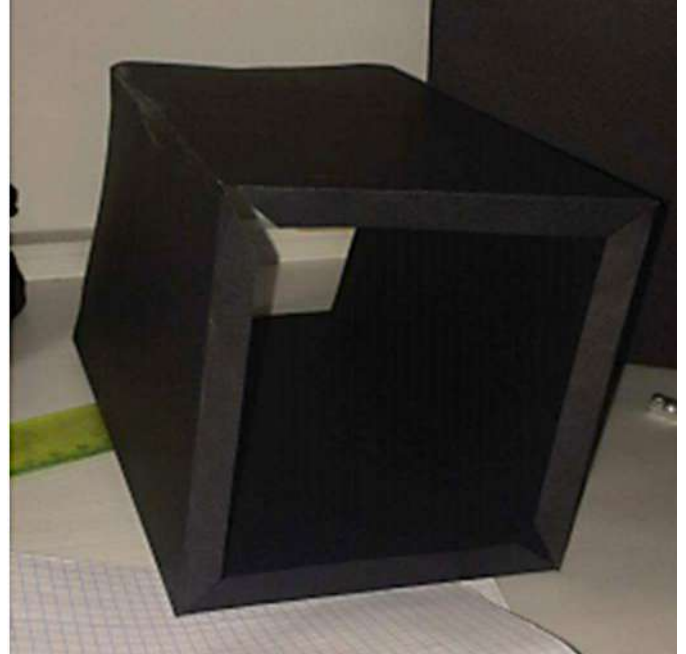


Fig. 4: Montaje de la caja 2



Fig. 5: Caja 2 con el papel vegetal

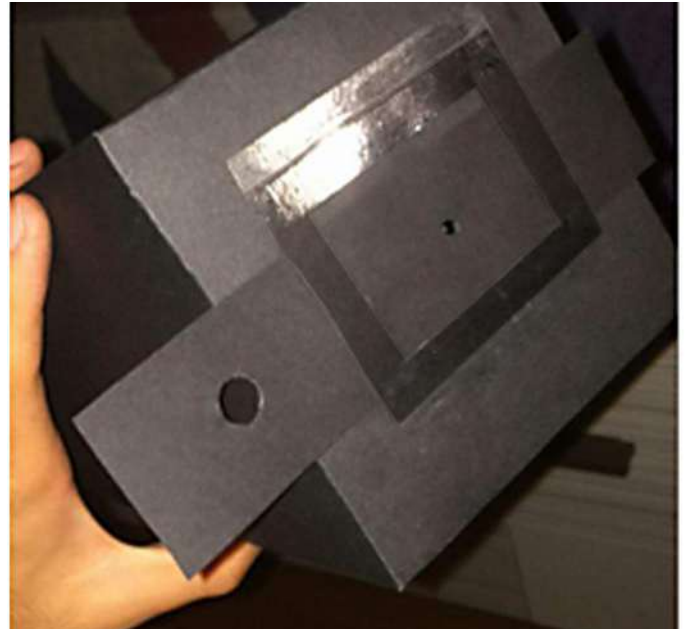
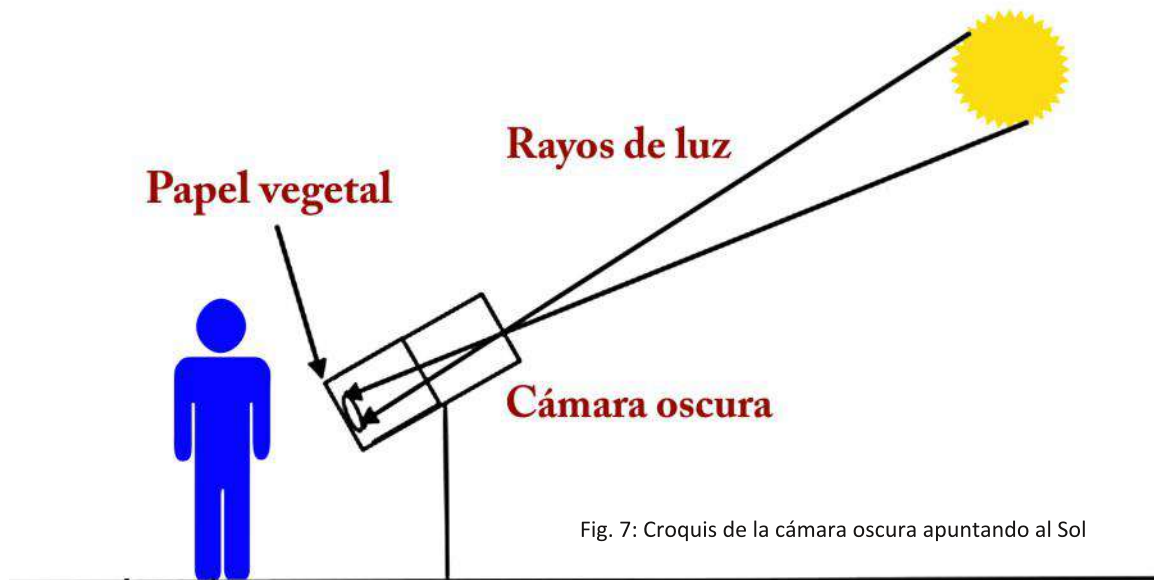


Fig. 6: Tira de cartulina con orificios de distintos diámetros en la boca de la caja 1



Se introduce la caja 2 dentro de la 1 de tal manera que la pantalla de papel vegetal quede al exterior, y se ensambla al trípode-soporte con cinta adhesiva. Se orienta la cámara de tal manera que los rayos del Sol incidan perpendicularmente en la cara frontal de la caja 1 (Fig. 7).

Dejamos que los alumnos se familiaricen con la cámara oscura: que vean cómo se apunta y qué pasa al variar la longitud y el diafragma. Se darán cuenta de que la imagen del Sol en la

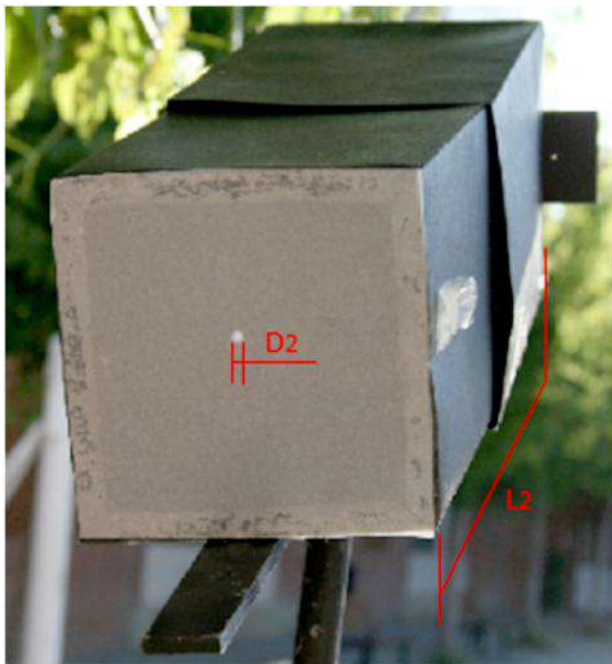


Fig. 8: Imagen del Sol proyectada en la pantalla de la cámara oscura



Fig. 9: Medida de la longitud de la cámara (L_2)

pantalla de papel cebolla es más nítida si se utilizan los orificios más pequeños de la tira, aunque quizá con el más pequeño casi no se vea y sea difícil medir el diámetro del Sol. Por otra parte, con longitudes grandes, las imágenes son más grandes pero menos brillantes. Las ventajas de elegir unos valores u otros es algo que los alumnos deben pensar y decidir (p. ej. para apuntar al Sol, es mejor usar un diafragma grande y una longitud pequeña, mientras que para medir la imagen del Sol, viene bien diafragmas pequeños para minimizar la zona de penumbra).

Se fija una longitud de la cámara y un diafragma. Se mide con un pie de rey el diámetro de la imagen proyectada del Sol (D_2), y con una cinta métrica la longitud de la cámara (L_2) (Fig. 8 y 9).

Se varía la longitud de la cámara oscura varias veces, desplazando la caja 2 de la caja 1, y se hacen nuevas medidas de D_2 y L_2 .

Se debe hacer notar que, como el pie de rey tiene una precisión de 0,1 mm, las medidas de D_2 en mm serán con un decimal. Sin embargo la cinta métrica tiene una precisión de 1 mm, por lo que L_2 en mm no tendrá decimales.

Resultados obtenidos, análisis y discusión

Con el dato de partida del diámetro del Sol $D_1 = 1,39 \cdot 10^6$ km, y nuestras cinco medidas, obtenemos los valores de L_1 de la Tabla 1.

Al analizar los valores de los resultados, se observa que el primero se aleja mucho de los otros. Se puede discutir con los alumnos: ¿puede ser porque haya variado la distancia que estamos calculando mientras medíamos?, ¿será por descuido en la medida?, ¿por imprecisión de los aparatos de medida? Y se puede decidir de forma racional (no porque nos convenga) si desechar ese valor, mantenerlo o repetir la medición.

En este caso lo hemos mantenido. Por tanto, el error absoluto sería la mayor diferencia con la media, o sea, $0,20 \cdot 10^8$ km. Y la distancia Tierra-Sol obtenida la podríamos expresar de la siguiente manera:

$$(\bar{L}_1 \pm E_{abs. \max.}) = (1,42 \pm 0,20) \cdot 10^8 \text{ km}$$

Medida	L_2 (mm)	D_2 (mm)	$L_1 = \frac{L_2 \times D_1}{D_2}$ (km)
1	361	4,1	$1,22 \cdot 10^8$
2	359	3,4	$1,47 \cdot 10^8$
3	360	3,3	$1,52 \cdot 10^8$
4	356	3,5	$1,41 \cdot 10^8$
5	370	3,5	$1,47 \cdot 10^8$

Tabla 1

$$\bar{L}_1 = 1,42 \cdot 10^8$$

Como el valor real de la distancia media Tierra-Sol es de $1'50 \cdot 10^8$ km, vemos que cae dentro del intervalo de error de nuestra medida. Podemos calcular el error relativo:

$$L_r = 1'50 \cdot 10^8 \text{ km}$$

$$L_j = 1'42 \cdot 10^8 \text{ km}$$

$$E_{rel} = \frac{|L_1 - L_r|}{L_r} \cdot 100 = \frac{|(1,42 - 1,50) \cdot 10^8|}{1,50 \cdot 10^8} \cdot 100 = \frac{0,08}{1,5} \cdot 100 = 5,3\%$$

El error relativo es del 5,3 %, un error aceptable, medianamente importante pero no excesivo.

Nótese que si hubiéramos rechazado la primera medida, el valor de la media sería $1,47 \cdot 10^8$, con un error absoluto del $0,06 \cdot 10^8$. El valor obtenido lo expresaríamos como $(1'47 \pm 0'06) \cdot 10^8$ km, y el error relativo sería del 2 %, bastante más preciso.

Finalmente, la cámara oscura también nos permite hacer una estimación por el mismo procedimiento de la distancia de la Tierra a la Luna^[2]. Es preciso hacer las mediciones una noche de Luna llena (Fig. 10 y 11), y las imágenes son bastante más débiles.

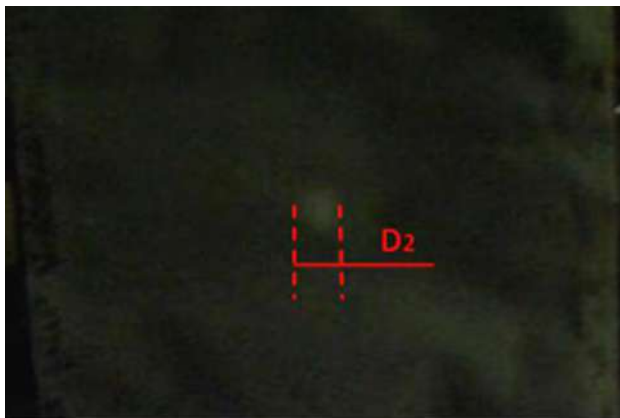


Fig. 10: Midiendo el diámetro de la imagen de la Luna



Fig. 11: Laura Latorre proyectando la imagen de la Luna en la pantalla de la cámara oscura

4. Referencias

[1]. Mesurant la distancia al Sol. Consultado el día 23/11/2029. Disponible en: <http://www.eso.org/public/outreach/eduoff/aol/market/collaboration/solpar/>

[2] Laura Latorre, 2009. Seguint les petjades còsmiques. Consultado el 29/11/2020. Disponible en <http://www.xtec.cat/iesguindavols/laura/treball.pdf>

¿HASTA CUÁNDO VA A BRILLAR EL SOL?

Anicet Cosialls Manonelles, Institut Guindàvols, anicetc@gmail.com



En este artículo, proponemos unos cálculos sencillos, reproducibles quizá con alumnos mayores, que nos permiten hacer una estimación del tiempo de vida del Sol, partiendo solamente del conocimiento de su masa, luminosidad, composición y del porcentaje en masa de H que hay en el núcleo.

Una de las grandes preguntas que se ha formulado la comunidad científica durante los últimos 150 años, y que se ha tardado en responder, ha sido: ¿por qué brilla el Sol, cómo obtiene la enorme cantidad de energía que hace posible la vida en la Tierra?

A mediados del siglo XIX se creía (H. von Helmholtz, J.R. Mayer, J.J. Waterson) que el origen de la energía solar se debía a la

contracción de la masa del Sol, proceso en el cual la energía potencial gravitatoria se transformaba en calor. En 1854, Darwin hizo una estimación de la edad de la Tierra basándose en el tiempo que creía necesario para que la erosión del agua en las rocas originase un valle en el sur de Inglaterra. Le atribuyó una edad de 300 millones de años, tiempo aparentemente suficiente para que la lenta selección natural hubiera producido la

gran diversidad de especies en la Tierra. Era evidente que los cambios geológicos y biológicos estaban relacionados con la energía recibida del Sol y con su edad.

El descubrimiento de la radioactividad (Becquerel, 1896), y la aceptación de los avances científicos de la Física a principios del siglo XX, hicieron posible dar mejores respuestas a dichas preguntas. En 1905, Einstein publica su Teoría General de la Relatividad, y sugiere que la masa y la energía son intercambiables ($E = mc^2$). La fórmula muestra que una pequeña cantidad de masa puede convertirse en una enorme cantidad de energía.

Fue en 1920 cuando F.W. Aston descubre que la masa de un átomo de He es inferior a la masa de cuatro átomos de hidrógeno, y A. Eddington sugiere que convertir hidrogeno en helio podría hacer brillar el Sol, según la relación entre la masa y la energía de Einstein.

Pero fue Hans Bethe, en 1939, quien dio una explicación satisfactoria a la reacción de fusión nuclear que se produce en el Sol, que permite que las estrellas brillen, y que ha posibilitado hacer una estimación de su tiempo de vida.

Vamos a hacer unos cálculos sencillos para hacer una estimación del tiempo de vida del Sol. Partimos solamente del conocimiento de su masa, luminosidad, composición, y del porcentaje en masa de H que hay en el núcleo.

Si se conoce la luminosidad^[1] del Sol ($3,8 \cdot 10^{26}$ W) y su masa ($2,00 \cdot 10^{30}$ kg) se puede hacer una estimación de su tiempo de vida^{[2][3]}.

Sabemos que el Sol emite cada segundo $3,8 \cdot 10^{26}$ J de energía (aunque la luminosidad del Sol ha sufrido ligeras variaciones en el transcurso del tiempo, consideraremos que éste es el valor medio y se mantiene constante), debido a la pérdida de masa en el proceso de fusión nuclear^[4], que viene dada por la expresión:

$$E = \Delta mc^2$$

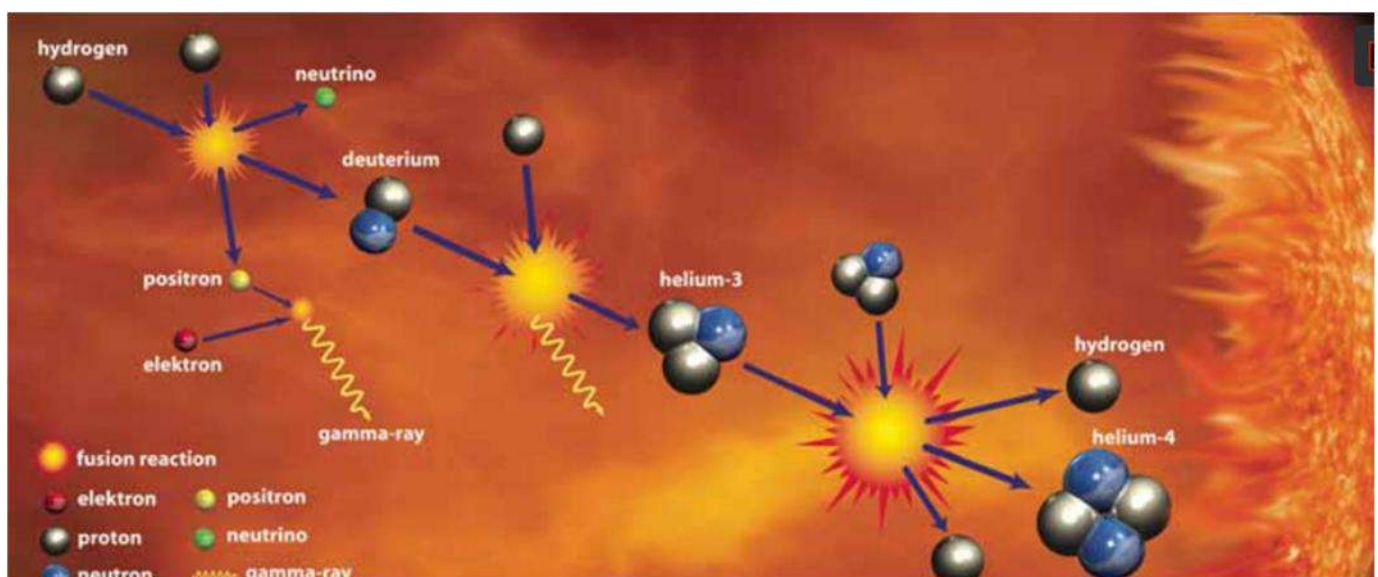
E es la energía, Δm la pérdida de masa, y c es el valor de la velocidad de la luz al vacío.

La cantidad de hidrógeno (Δm) que el Sol transforma en energía cada segundo es:

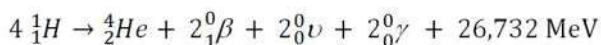
$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{3,8 \cdot 10^{26}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4,37 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

es decir, 4,37 millones de toneladas de H cada segundo.

Imagen 1. Fusión nuclear. Cadena protón-protón. Cortesía de Mark Tiele Westra.



En un principio, supondremos que toda esta energía que se produce proviene de la reacción nuclear de fusión nuclear del ciclo protón-protón que tiene lugar en el Sol.^{[5][6]} (Imagen 1)



En las reacciones nucleares no se cumple el principio de conservación de la masa porque la masa de los reactivos no coincide con la masa de los productos de la reacción. Esta diferencia (Δm) se transforma en energía (E).

$$\text{Masa de } ({}^1_1\text{H}) = 1,00784 \text{ u}$$

$$\text{Masa de } ({}^4_2\text{He}) = 4,002602 \text{ u}$$

efecto

En efecto,

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_o - m = 4m({}^1_1\text{H}) - m({}^4_2\text{He}) = \\ &= 4 \times 1,00784 - 4,0026 = 4,030136 - 4,00260 = \\ &= \mathbf{0,028758 \text{ u}} \end{aligned}$$

La masa del átomo de He es inferior a la masa de los 4 átomos de H.

El porcentaje de la masa inicial de hidrógeno (m_o) que se transforma en energía es:

$$\% m_o = \frac{0,028758}{4,030136} \times 100 = \mathbf{0,713\%}$$

El 0,713% de la masa inicial del núcleo del Sol ha “desaparecido”. La “masa desaparecida” se transforma en energía, y esta energía es la responsable de hacer brillar el Sol.

O sea, si cada segundo desaparecen 4,37 millones de toneladas de H para convertirse en energía ($E = \Delta m \cdot c^2$), y esta cantidad representa el 0,713% de la masa total de H que el Sol fusiona en un segundo, se puede calcular la masa total de H fusionada en un segundo:

$$4,37 \cdot 10^6 \text{ toneladas de H} \cdot \frac{100}{0,713} = 612 \cdot 10^6 \text{ toneladas de H}$$

Es decir, cada segundo, el Sol fusiona aproximadamente alrededor de 612 millones de toneladas de H que se convierten en 608 de toneladas de He.

Se sabe que el Sol y su sistema planetario se formaron casi simultáneamente a partir de la misma nube de gas y polvo, con lo cual podemos asignarle una edad similar a la Tierra. La edad de la Tierra se conoce a partir de la datación radioactiva de las rocas y es de 4.600 millones de años.

Podemos hacer una estimación de la masa del Sol transformada en energía durante estos 4600 millones de años. En efecto, teniendo en cuenta que un año tiene 31.557.600 s:

$$4,6 \cdot 10^9 \cdot 31.557.600 \cdot 4,37 \cdot 10^9 = \mathbf{6,34 \cdot 10^{26} \text{ kg de H}}$$

Este valor es enorme, pero despreciable respecto a la masa del Sol. La pérdida de masa durante estos 4600 millones de años representa un 0,03% del valor de la masa actual. Con lo que consideraremos que la masa del Sol se ha mantenido prácticamente constante desde sus inicios.

Suponiendo que el ritmo de fusión nuclear se ha mantenido constante ($6,12 \cdot 10^{11}$ kg de H/s) desde que el Sol ingresó en la secuencia principal y comenzó a fusionar H, podemos escribir:

$$M = M_o - 6,12 \cdot 10^{11} t$$

M es la masa final del Sol (kg), M_o la masa inicial del Sol (kg) y t es el tiempo (s).

Si representamos M en función de t (ver imagen 2), se obtiene una línea recta que corta el eje de abscisas en el instante t en el que $M=0$

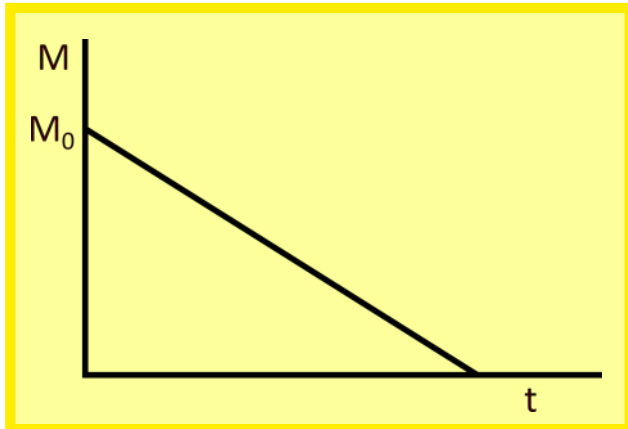


Imagen 2. Gráfico masa de H en el Sol - tiempo

(final de la vida del Sol). De este modo se puede hacer una estimación de su tiempo de vida.

$$M_0 = 2,00 \cdot 10^{30} - 6,07 \cdot 10^{11} t \rightarrow$$

$$t = \frac{2,00 \cdot 10^{30}}{6,12 \cdot 10^{11}} = 3,27 \cdot 10^{18} s = 1,04 \cdot 10^{11} \text{ años} =$$

$$= \mathbf{104.000 \text{ millones de años}}$$

El valor calculado de este modo nos da un resultado diez veces mayor que el valor estimado por la comunidad científica, que le otorga una vida aproximada de 10.000 millones de años.

El error principal que hemos cometido ha sido suponer que toda la masa del Sol es H, y que todo el H se convierte en helio.

Cabe decir, que el Sol, al igual que todas las estrellas que tienen una masa inferior a 8 masas solares, evolucionan, y en sus etapas finales se convierten en una estrella gigante roja que termina liberando al espacio sus capas externas formando un bonito envoltorio de gas: una nebulosa planetaria con una enana blanca masiva en el centro. Con lo que, no toda la masa de hidrógeno del Sol se transforma en energía.

Para encontrar el tiempo de vida del Sol y evitar el error cometido anteriormente, debemos hacer una estimación de la cantidad de H que hay en el núcleo del Sol que se puede convertir en energía. Para llevar a cabo todo

esto, debemos de hacer las siguientes consideraciones:

Solo el 77,2% de la masa del Sol primitivo era hidrógeno. Este valor se obtiene a partir de la masa actual del Sol, del porcentaje^[7] de H actual (73,4%), y de la cantidad de H que el Sol ha quemado desde su inicio.

$$2,00 \cdot 10^{30} \text{ kg de H} \times 0,734 = 1,468 \cdot 10^{30} \text{ kg de H}$$

$$6,12 \cdot 10^{11} \frac{\text{kg H}}{\text{s}} \times 4600 \cdot 10^6 \text{ años} \times 365,25 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s} :$$

$$= 8,88 \cdot 10^{28} \text{ kg de H}$$

La masa total de H al inicio era

$$1,468 \cdot 10^{30} + 8,88 \cdot 10^{28} = 1,5568 \cdot 10^{30} \text{ kg de H}$$

Y el porcentaje de H al inicio fue:

$$\%m(H) = \frac{1,5568 \cdot 10^{30}}{2,00 \cdot 10^{30}} \times 100 = \mathbf{77,8\%}$$

De todo el hidrógeno del Sol, solamente el 12,5%^[3] se encuentra en el núcleo, donde hay la temperatura suficiente para que tenga lugar la fusión nuclear (Imagen 3).

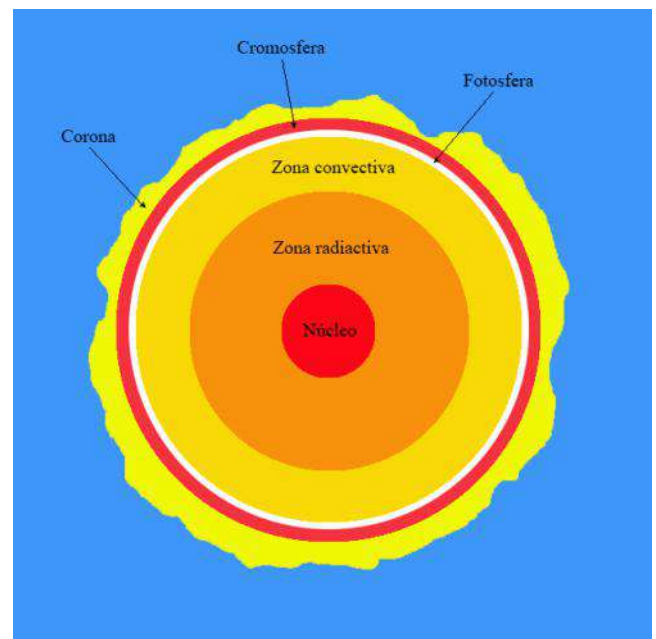


Imagen 3. Estructura del Sol.

<https://astronomiaparatodos.com/2018/02/21/la-estructura-del-sol/>

Teniendo en cuenta todo esto, la masa disponible de hidrógeno es:

$$2,00 \cdot 10^{30} \times 0,778 \times 0,125 = 1,94 \cdot 10^{29} \text{ kg}$$

El nuevo tiempo de vida del Sol será:

$$\frac{\text{masa disponible H}}{\text{masa que quema en 1 s}} = \frac{1,94 \cdot 10^{29}}{6,12 \cdot 10^{11}} = 3,17 \cdot 10^{17} \text{ s}$$

→ 10.045 millones de años

Sabiendo que su antigüedad es parecida a la edad de la Tierra (4600 millones de años), el tiempo de vida que le queda al Sol es de 5445 millones de años aproximadamente.

Según las teorías de evolución estelar, el Sol se convertirá en una estrella gigante roja cuando abandone la secuencia principal, aumentando su volumen de tal manera, que atraparé las órbitas de Mercurio, Venus, y quizás también la Tierra. Afortunadamente, no hay que preocuparse todavía, nos queda mucho tiempo para seguir disfrutando en nuestro planeta.

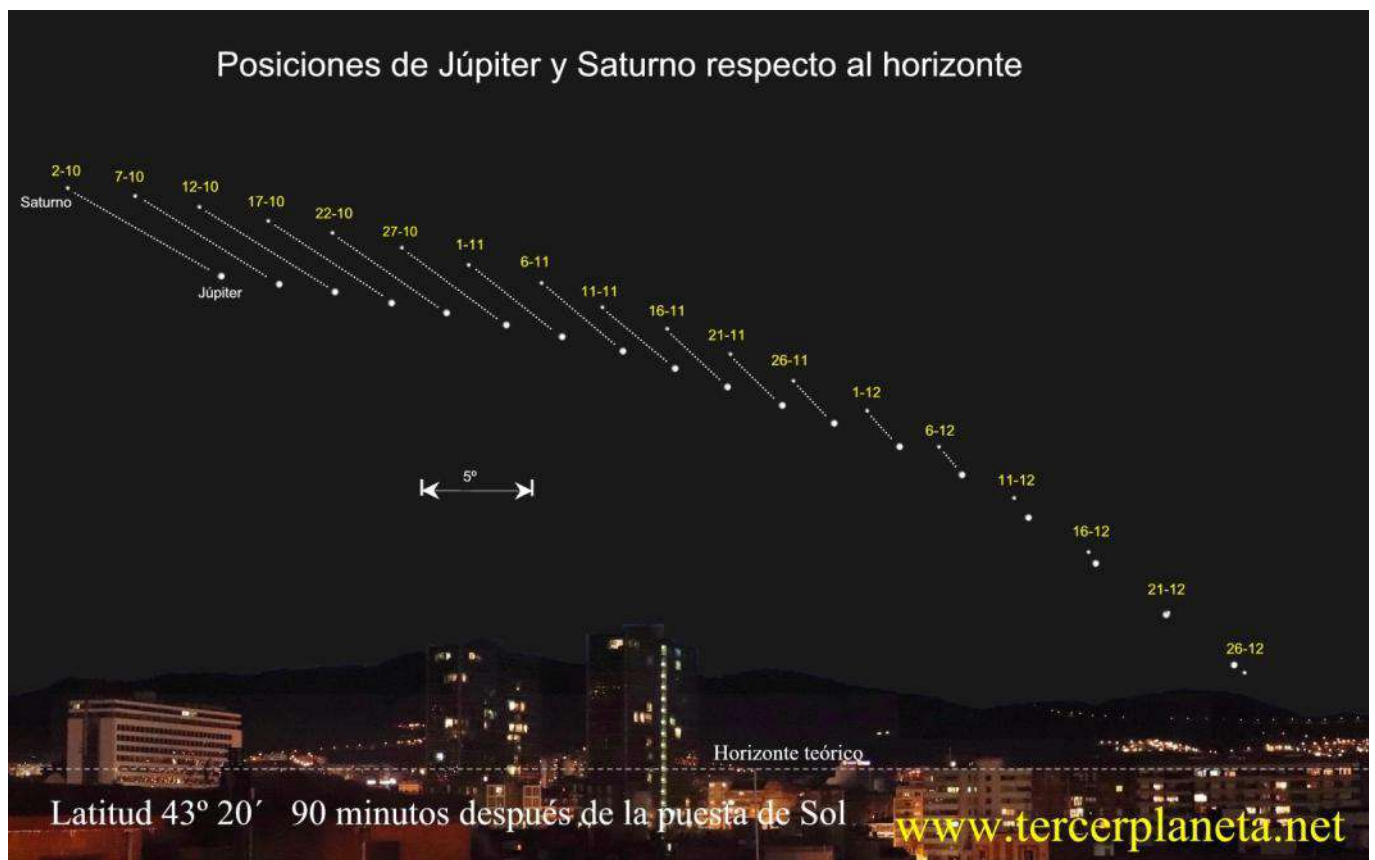
Referencias bibliográficas

- [1] EAAE - Luminosity and temperature of the Sun. Disponible en: <https://www.eaae-astronomy.org/workshops/luminosity-and-temperature-of-the-sun> [Accedido el 04/10/2020]
- [2] How do you calculate the lifetime of the Sun? Disponible en: <http://curious.astro.cornell.edu/about-us/51-our-solar-system/the-sun/birth-death-and-evolution-of-the-sun/167-how-do-you-calculate-the-lifetime-of-the-sun-advanced> [Accedido el 04/10/2020]
- [3] Estimating the Sun's lifetime. Disponible en: <https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=76151§ion=3.3> [Accedido el 04/10/2020]
- [4] Curso básico de fusión nuclear. Disponible en: http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2017/10/Libro-JJNN-CBFN-version_digital.pdf [Accedido el 04/10/2020]
- [5] Mark Tiele Westra, 2006, Fusion in the Universe: the power of the Sun. Disponible en: https://www.scienceinschool.org/sites/default/files/teaserPdf/issue3_fusion.pdf [Accedido el 04/10/2020]
- [6] Rafael Bachiller. El Sol: Nuestra estrella, nuestra energía. Disponible en: <http://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/elsolnuestraestrella.pdf> [Accedido el 04/10/2020]
- [7] David Galadí y Jordi Gutiérrez, 2001. Astronomía General. Página 650. Editorial Omega.

SIGUIENDO EN ApEA LA GRAN CONJUNCIÓN

Socios de ApEA

El 21 de diciembre de 2020 Júpiter y Saturno tuvieron la esperada gran conjunción. Sería la primera vez que se podrían ver juntos en el ocular del telescopio. Entre los socios de ApEA hubo gran actividad para observarlo, a pesar del mal tiempo y las nubes que cubrieron algunas zonas. Pero como hay socios en toda la geografía española, pudimos compartir fotos, algunas de las cuales las incluimos aquí.



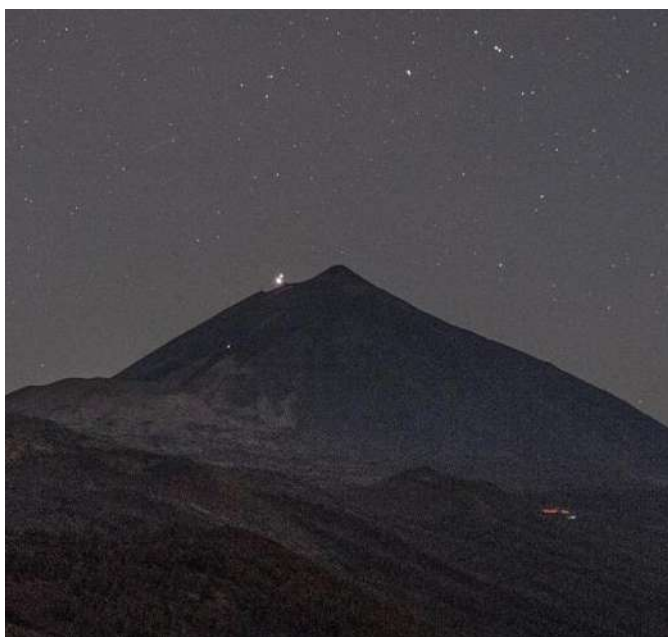
Esteban Esteban publicó los días previos varios interesantes artículos en su blog. Aquí muestra lo que íbamos a ver.



Sebastián Cardenete, desde Málaga, hizo famosos a los geranios de su ventana. Incluso hubo una "doble conjunción" en la foto de arriba a la derecha.



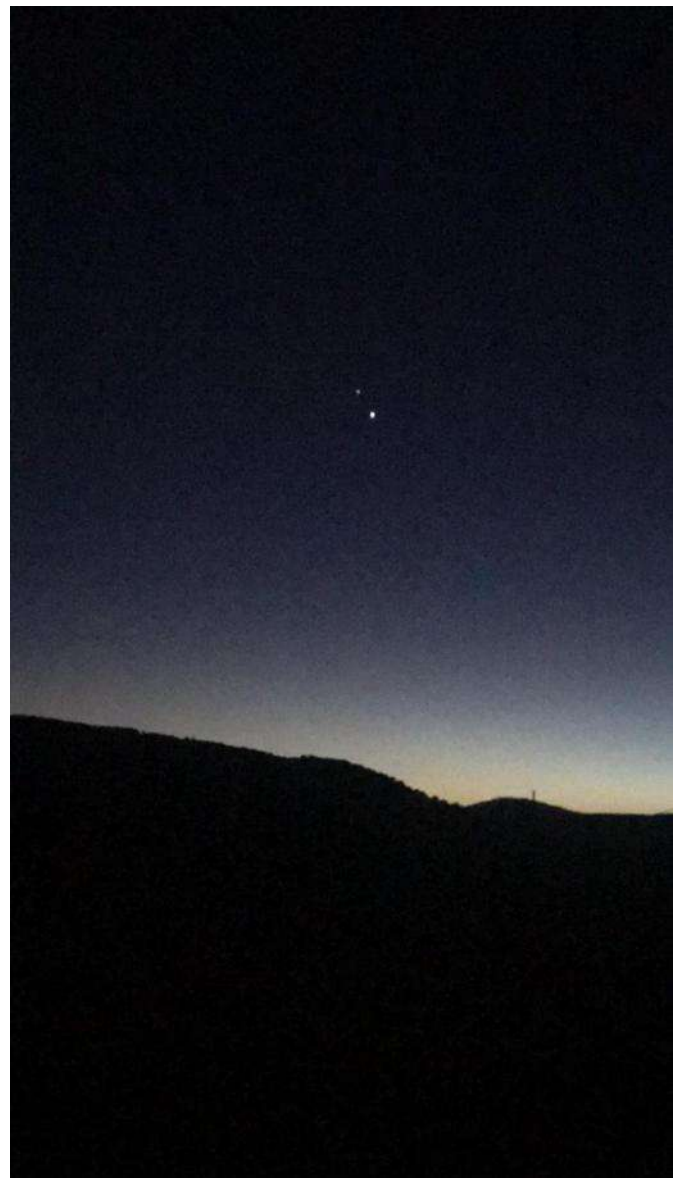
Las de Federico Fernández Porredón desde Tenerife no defraudaron



Esteban Esteban compartió estas fotografías, desde su casa en Bilbao. Hay que explicar que tiene una "ventana mágica".



Angela del Castillo sacó todo su arsenal para verlo desde su Escuela Cosmofísica (Titaguas, Valencia)



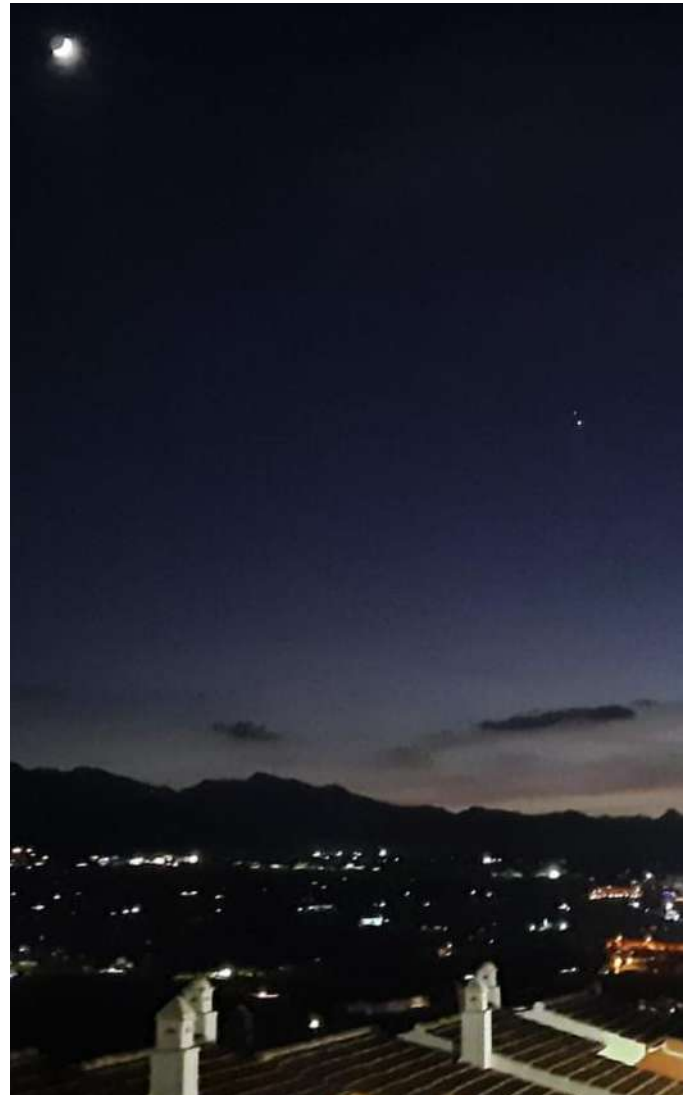
Y estas son de otros socios de ApEA



Francisco Gálvez, el 15-XII



Francisco Gálvez, el 21-XII



Francisco Gálvez, el 18-XII



Sensi Pastor, desde Murcia



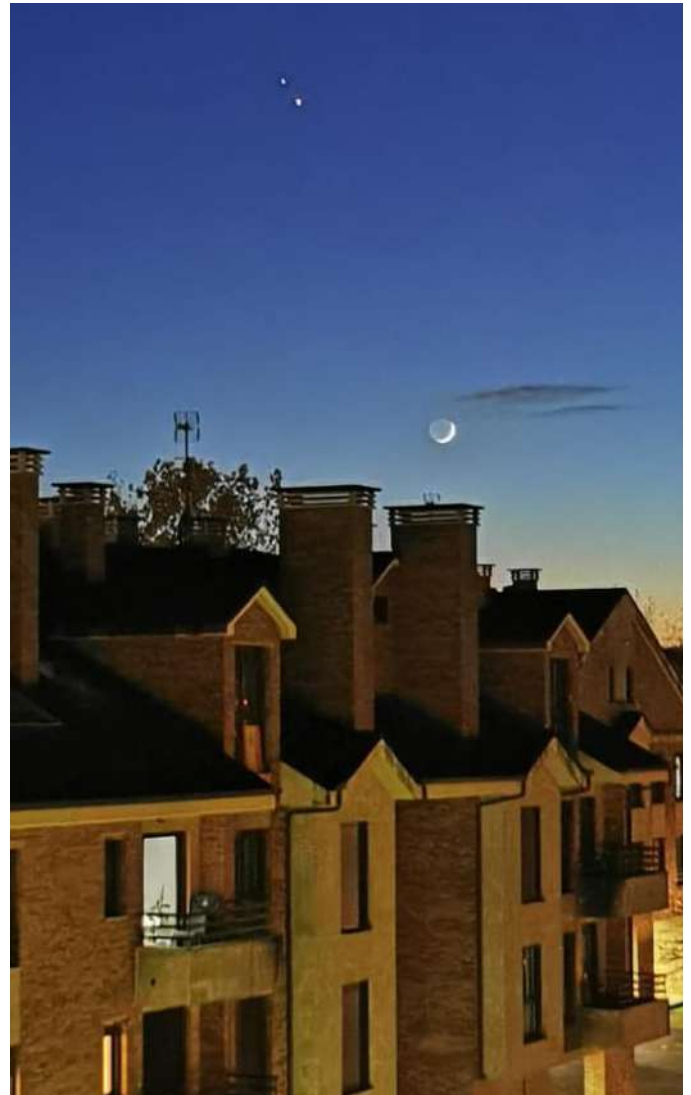
Sensi Pastor, desde Murcia



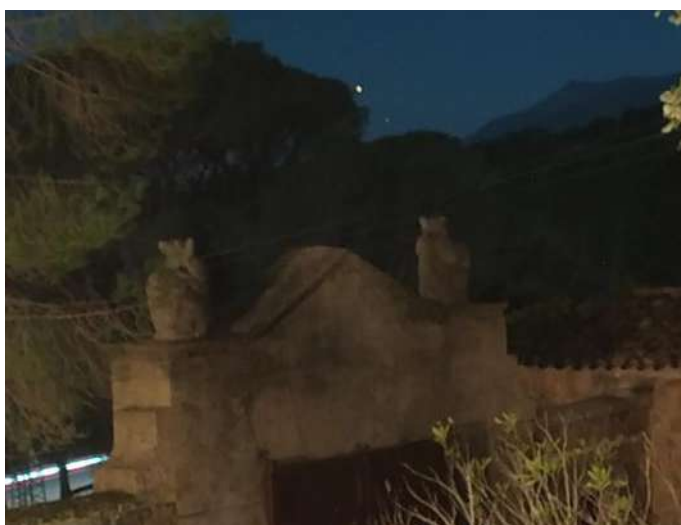
Alfonso Coya, en el Observatorio de Deva, en Gijón



Julen Sarasola sacó su ballestilla en San Sebastián para medir la separación entre los planetas. Todo un clásico.



Alfonso Coya, desde Gijón



Ricardo Moreno, en Piedralaves (Ávila), el 29-XII



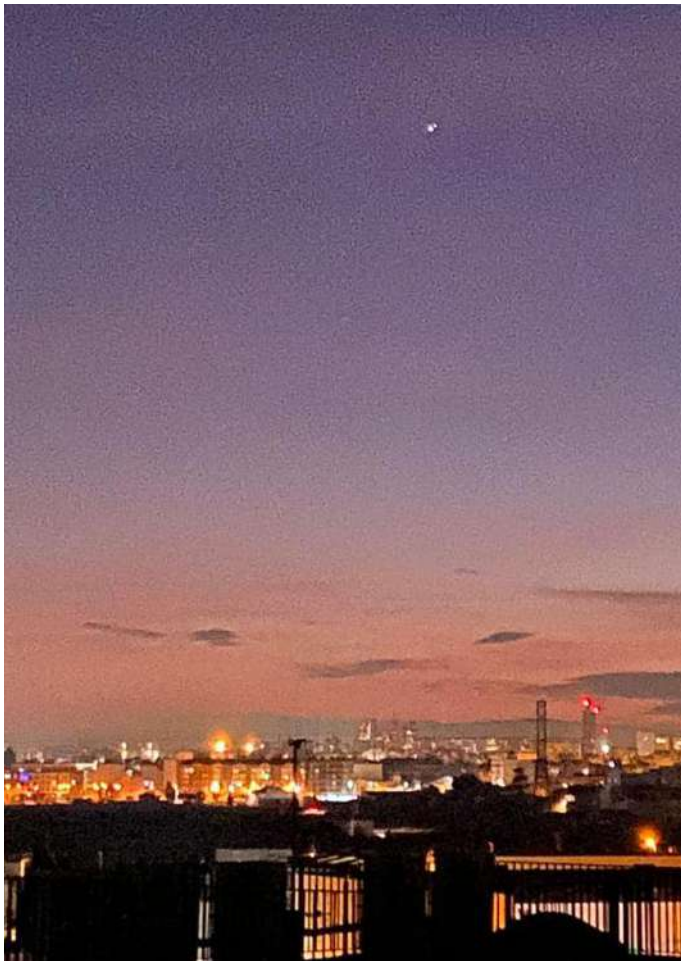
Ricardo Moreno en el Belén de su casa, el 24.XII



Carolina Clavijo, desde Sevilla, el 20-XII



Antonio R. Acedo, en Ronda, el 20-XII



Rafael García de los Reyes, desde Valencia, el 20-XII





Manu Arregi, el 17-XII

Manu Arregi: preparando el material



Sebastian Cardenete, con el móvil, un ocular de 20 y un telescopio refractor Vixen de 150. El día 20-XII





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

