

revista
NaDiR

Nº 35 XI 2019

RELOJ DE SOL
MONUMENTAL EN
CUENCA

EL REAL
OBSERVATORIO
ASTRONÓMICO,
UNA JOYA EN EL
CENTRO DE MADRID

DIAGRAMA DE
EVOLUCIÓN
ESTELAR

MIDIENDO LA LUNA

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



ApEA

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

Presidenta:

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

Vocal Encuentros:

M, Carmen Botella

Vocal Encuentros:

Fernando Ordóñez

Vocales:

Esteban Esteban Peñalba

Sensi Pastor Rodríguez

Manu Arregi Biziola

Edición de la revista Nadir:

Ricardo Moreno Luquero

rmluquero@gmail.com

Depósito Legal: Z-2513-98

ISSN: 1575-7528

Noviembre 2019

EDITORIAL

Carolina Clavijo Aumont

3

EXPERIENCIAS EN LA CALLE

RELOJ DE SOL MONUMENTAL EN CUENCA

Joaquín Álvaro – Keiko Matakis

4

CENTROS

EL REAL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO, UNA JOYA EN EL CENTRO DE MADRID

Agustín Laviña

8

INVESTIGACIONES DE LOS SOCIOS

DIAGRAMA DE EVOLUCIÓN ESTELAR

Isidoro González Navarro

13

EXPERIENCIAS EN EL AULA

MIDIENDO LA LUNA

Esteban Esteban Peñalba

20

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.

EDITORIAL

En los últimos encuentros de Úbeda de 2019, los socios de ApEA decidieron dar su apoyo a una nueva Junta directiva, de la que tengo el placer y la responsabilidad de ser su nueva Presidenta. Empieza así una nueva etapa en nuestra Asociación, con grandes retos.

El próximo mes de febrero se cumplen 25 años de la fundación de la ApEA, nació fruto de las inquietudes de un colectivo de profesionales preocupados por la enseñanza de la Astronomía en este país. Surgen así los Encuentros, las Publicaciones, las Revistas y las observaciones anuales; y se publican gran cantidad de materiales que hoy en día son referencia en nuestro país. Este será mi primer reto, dinamizar los encuentros entre los socios y fomentar la publicación de materiales de astronomía tales como publicaciones, artículos, talleres... que sigan contribuyendo a la enseñanza y organización de actividades.

Otro gran reto será seguir aumentando el número de socios, a través de la web, los Encuentros y todas aquellas actividades que organicemos. Para ello también se ha ampliado la presencia de ApEA en las redes sociales: estamos en twitter, facebook y tenemos una renovada web muy completa, en la que se pueden consultar todos los materiales y actividades. Así mismo se ha retomado la publicación de la revista Nadir, con el compromiso de publicar dos números al año.

Aumentar nuestra presencia en las redes y participar en proyectos nacionales e internacionales, será otro gran reto.

En la actualidad hay grandes misiones espaciales, como la vuelta del ser humano a la Luna, las misiones a Marte, grandes descubrimientos como las ondas gravitacionales... Son noticias que pueden y deben dar un impulso al interés por acercarse a la Astronomía, y ahí estaremos como Asociación, investigando y aportando materiales para trabajar.

En julio de 2021 tendrán lugar los próximos encuentros de ApEA en mi ciudad, Sevilla. Ya hay una Comisión Organizadora planificando actividades que seguro serán de interés para nuestros socios.

Como primera mujer presidenta de la ApEA, espero contribuir a su desarrollo y os invito a todos a seguir participando y aportando conocimientos y materiales a nuestra Asociación.

Carolina Clavijo Aumont
Presidenta de ApEA

RELOJ DE SOL MONUMENTAL

Plaza Taiyó, Cuenca

Joaquín Álvaro – Keiko Matakí



Inaugurada en 2006, la plaza Taiyó, (plaza del Sol), es un espacio lúdico integrado en el paisaje urbano de Cuenca. Aquí, el mismo Sol juega con su dinámica de luces y sombras al ritmo de los ciclos eternos que marcan el día a día, año tras año, en el devenir perpetuo de un tiempo casi inmutable, que invita a descubrir la magia de su misterio oculto.

Este espacio abierto, dominado por un gnomon de 6.72 m con forma cónica como cucurucho de nazareno, o gorro de mago, que determina las dimensiones de la plaza, está salpicada por diferentes objetos de teselas multicolores y formas caprichosas que cobran vida cuando los rayos del sol juegan con ellas.

Diseñada por Keiko Matakí, artista japonesa vinculada estrechamente con Cuenca y que motiva el término Taiyó, (sol), para

referirse a la plaza, despliega sobre una superficie circular de 30 m de diámetro las entrañas de un reloj de sol monumental.



El conjunto es un magnífico recurso didáctico para los colegios, ya que invita a explicar los movimientos de la Tierra en torno al Sol y a conocer algunas de sus características más determinantes, pero también a profundizar en los detalles de la mecánica celeste.

La plaza en sí misma, concebida para ser usada, junto con los materiales empleados en su construcción, hacen el entorno sumamente sensible a su desgaste y deterioro, lo que obliga a continuas restauraciones, algo que no impide

y no supuso nunca una excusa para el rigor en los cálculos y una pretendida y razonable, exactitud en las marcas del tiempo que señala el reloj.

Los cálculos, realizados por Joaquín Álvaro, tienen en cuenta, no sólo los propios de un reloj de sol horizontal como es éste, sino que también contemplan aspectos como la necesaria inclinación de la superficie donde el sol proyecta su sombra, (para escurrir de las aguas de lluvia), así como efectos debidos al comportamiento de la sombra producida por un foco extenso sobre un objeto de anchura variable, como resulta ser la sección cónica afectada, sección eficaz, cuando la sombra se alarga ampliamente en los días de invierno.

Dadas las dimensiones del reloj de sol, la ecuación del tiempo se muestra relevante y produce efectos significativos y medibles, por lo que cada una de las horas están dibujadas en el suelo con la forma de sus analemas. Se resaltan igualmente los equinoccios y los solsticios, así como los pasos del sol por las correspondientes constelaciones del zodiaco y las líneas de la hora solar media. Inaugurada en 2006, la plaza Taiyó, (plaza del Sol), es un espacio lúdico integrado en el paisaje urbano de Cuenca. Aquí, el mismo Sol juega con su dinámica de luces y sombras al ritmo de los ciclos eternos que marcan el día a día, año tras año, en el devenir perpetuo de un tiempo casi inmutable, que invita a descubrir la magia de su misterio oculto.

Este espacio abierto, dominado por un gnomon de 6.72 m con forma cónica como un cucurucho



de nazareno, o gorro de mago, que determina las dimensiones de la plaza, está salpicada por diferentes objetos de teselas multicolores y formas caprichosas que cobran vida cuando los rayos del sol juegan con ellas.



Diseñada por Keiko Mataki, artista japonesa vinculada estrechamente con Cuenca y que motiva el término Taiyó, (sol), para referirse a la plaza, despliega sobre una superficie circular de 30 m de diámetro las entrañas de un reloj de sol monumental.



El conjunto es un magnífico recurso didáctico para los colegios, ya que invita a explicar los movimientos de la Tierra en torno al Sol y a conocer algunas de sus características más determinantes, pero también a profundizar en los detalles de la mecánica celeste.

La plaza en sí misma, concebida para ser usada, junto con los materiales empleados en su construcción, hacen el entorno sumamente sensible a su desgaste y deterioro, lo que obliga a continuas restauraciones, algo que no impide y

no supuso nunca una excusa para el rigor en los cálculos y una pretendida, y razonable, exactitud en las marcas del tiempo que señala el reloj.



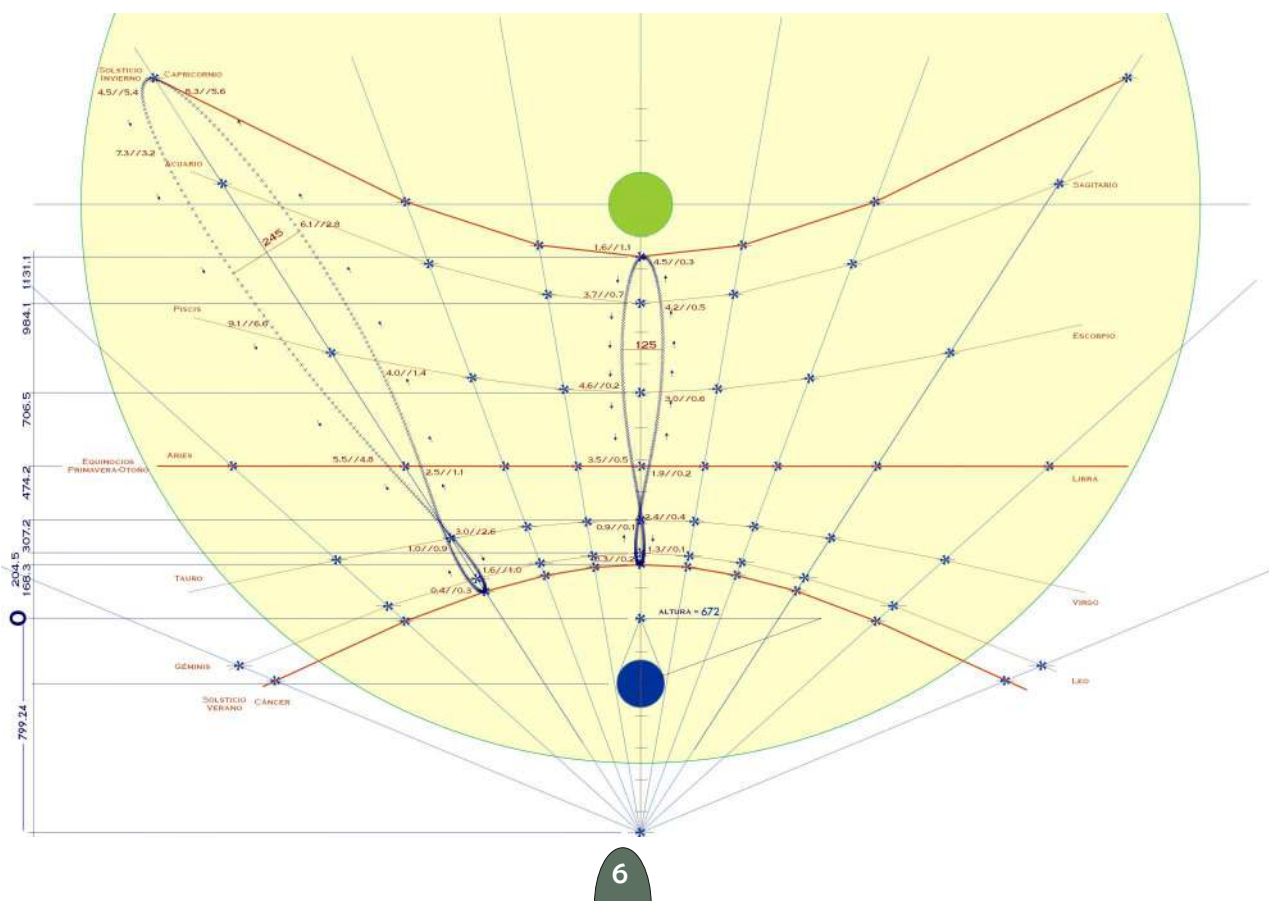
Los cálculos, realizados por Joaquín Álvaro, tienen en cuenta, no sólo los propios de un reloj de sol horizontal como es éste, sino que también contemplan aspectos como la necesaria inclinación de la superficie donde el sol proyecta su sombra, (para escorrentía de las aguas de lluvia), así como efectos debidos al

comportamiento de la sombra producida por un foco extenso sobre un objeto de anchura variable, como resulta ser la sección cónica afectada, sección eficaz, cuando la sombra se



alarga ampliamente en los días de invierno.

El complejo solar fue motivo suficiente para la celebración en Cuenca, (2008), del primer Congreso Internacional de Sol con asistencia de destacados gnometistas de España, Italia, Francia y Japón.





PLAZA TAIYO 太陽 広場

- 1 Gnomon AMATERASU
- 2 Hora Solar
- 3 Km.0 Viaje Solitario
- 4 Solo (5 en raya, 3 en raya)
- 5 Pareja (Ajedrez, 3 en raya)
- 6 O más (Ajedrez, 3 en raya)
- 7 MITEMITE
Agujero A: Plena Luz 23 Mayo 12'00
Agujero B: "Camino a OKANO"
- 8 MUÑECA
- 9 Fútbol de Chapas
- 10 Diana
- 11 Dentro del Aro
- 12 Mini SUMO Feliz
- 13 Peana
Agujero C: Plena luz 23 Mayo 10'00
Agujero D: Plena luz 23 Mayo 18'00

Verano 2006

Creación y Diseño
KEIKO MATAKI

EL REAL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO, UNA JOYA EN EL CENTRO DE MADRID

Agustín Laviña



En el Centro de Madrid tenemos un singular monumento del Siglo XVIII que muy pocos madrileños conocen. Se trata del Real Observatorio Astronómico situado en el extremo sur del Parque del Retiro, en el llamado cerro de San Blas. Hoy día no es posible la observación de los astros desde este lugar debido a la contaminación lumínica en las cercanías de la plaza de Atocha. No obstante es una joya de la arquitectura que debemos visitar y que en su día fue un importante lugar de investigación de

fenómenos astronómicos, geodésicos y meteorológicos

Fue fundado por iniciativa de Carlos III a sugerencia de Jorge Juan, Capitán de la Compañía de Guardias Marinas desde 1751. Este gran marino e investigador español había sido uno de los participantes que, junto Antonio de Ulloa y otros científicos franceses de la Academia de Ciencias de París, Louis Godin y Charles Marie de La Condamine, realizaron una expedición al Perú que se prolongó más de 8 años (de 1736 a 1744) con objeto de medir un arco de meridiano

ecuatorial y demostrar de esta forma el achatamiento polar de La Tierra, idea que ya había predicho Isaac Newton.



Observatorio Astronómico, lámina del año 1800

Al volver de dicho viaje convenció a las autoridades para colocar a España en la senda de las potencias científicas europeas a cuya cabeza estaban Francia e Inglaterra. Con tal motivo y a propuesta de Jorge Juan se crean dos importantes Instituciones. En primer lugar en 1753 bajo el mandato del Marqués de la Ensenada nace el ROA (Real Observatorio de la Armada), ubicado en el Castillo de la Villa (Cádiz), sede de la Academia de Guardias Marinas. Con ello se pretendía que los futuros oficiales de la Marina aprendiesen y dominasen una ciencia tan necesaria para la navegación como era entonces la Astronomía. Posteriormente fue trasladado a San Fernando (Cádiz). Años

después, en 1790, se inicia la construcción del Real Observatorio Astronómico de Madrid, cuyo proyecto y obra inicial es dirigido por el arquitecto oficial de Carlos III, Juan de Villanueva. El Observatorio formaba parte de una misma campaña ilustrada de creación de establecimientos vinculados al estudio de la Ciencias Naturales en el entorno del Paseo del Prado de San Jerónimo. El reinado apostaba por el conocimiento de la Ciencias y por ello se proyectó esta Colina de la Ciencias compuesto por el Museo de Historia Natural, hoy pinacoteca del Prado, el Jardín Botánico y el Observatorio Astronómico. El edificio se concibe como Templo de la Razón y de la Ciencia.

El Observatorio consta de tres lugares destacados: el edificio Villanueva, el telescopio Herschel y la Sala de la Tierra y el Universo.

• Edificio Villanueva,

de estilo neoclásico, contiene:

- La rotonda central con un interesante péndulo de Foucault, una serie de telescopios reflectores.
- Una bellísima biblioteca donde además de libros históricos contienen las primeras fotografías de eclipses de Sol y una medida histórica a principios del siglo XX de la aceleración de la gravedad g con una resolución de seis decimales.
- Una sala con colección diversos relojes y el



Carlos III



Juan de Villanueva



William Herschel



Telescopio, para dar la hora al paso de el meridiano

círculo meridiano donde, por medio del movimiento de la culminación de las estrellas de referencia al pasar por el meridiano, se medía oficialmente el tiempo en España cuya



Telescopio Herschel, lámina del siglo XIX

información horaria se daba diariamente al Ministerio de la Gobernación sito en la Puerta del Sol.

• Telescopio de Herschel.

Cuando se decidió la construcción del edificio se encargó un gran telescopio al mejor fabricante de la época, William Herschel. En realidad se trataba de un músico alemán residente en el sur de Inglaterra pero su gran afición era la Astronomía. A tal fin construía sin lugar a dudas los mejores telescopios de reflexión de la época. Por ello todos los aristócratas europeos le encargaban la fabricación de estos instrumentos. El pulido del espejo cóncavo era clave para que la óptica del aparato permitiera observar los astros con grandes aumentos y lo que es más importante captando toda su luz.



Telescopio, reconstrucción del año 2004

Hay que tener en cuenta que un telescopio como el que hay en el Observatorio con un espejo de 60 cm de diámetro frente a los 6 mm de nuestra pupila, es capaz de captar $(600/6)^2 = 10.000$ veces más de luz; de esta forma podremos observar estrellas, nebulosas y galaxias de baja luminosidad que a simple vista no podríamos detectar.

Herschel, con la ayuda de su hermana pequeña Caroline catalogó más de 20.000 nuevos objetos celestes y descubrió el

movimiento del planeta Urano conocido desde la antigüedad pero que, al considerar que estaba en reposo, se confundía con una estrella fija. Este hecho le llevó a una disputa con el astrónomo Real y Director del Observatorio de Greenwich, Nevil Maskeline. Éste no podía creer que un advenedizo de la Astronomía como era este músico alemán hubiera descubierto un séptimo planeta y le acusó de falsedad. No obstante tuvo que cambiar de opinión cuando, al visitar con una delegación oficial con otros astrónomos el observatorio de Herschel y observar por su telescopio, pudo comprobar el movimiento del astro y con ello aceptar el descubrimiento del nuevo planeta.

EL Observatorio de Madrid encargó a Herschel la construcción de varios telescopios pequeños y uno grande de 25 pies (7,62 m) con un espejo de unos 60 cm de diámetro. Se encargó al astrónomo español José de Mendoza y Ríos que se trasladase a Inglaterra para que siguiese de cerca la construcción del mismo y realizase asimismo la realización de los planos

que posibilitasen el montaje del mismo en Madrid. El 7 de enero de 1802 el instrumento y su material accesorio zarparía en el bergantín la Juana hacia Bilbao. A su llegada es montado en cuatro grandes carros y en varias carretas adicionales. El viaje hacia Madrid estuvo lleno de peripecias, pero nada comparado con el accidente que tuvo en el puerto de Orduña el jefe de taller de instrumentos y mejor especialista con que contaba el Observatorio, Carlos Rodríguez, el cual falleció parece ser que al caer de su caballo y golpearse mortalmente la cabeza contra una roca.

Tras un complicado montaje en el edificio construido para tal fin y después de una visita del rey Carlos IV, se realizó la primera observación el 18 de agosto de 1804. Era el segundo telescopio más grande del mundo, pero el primero en calidad óptica y situaba a España en una excelente posición para el desarrollo de la ciencia. El propio Herschel, que utilizaba un telescopio similar para sus observaciones, financiadas por la Corona británica, afirmaba:



“Urano está mejor definido en este instrumento que lo que jamás he visto”.

Con la llegada de las tropas napoleónicas en 1808 se consideró este lugar como estratégico, y fue elegido como polvorín por el ejército francés. Para soportar el frío invernal se utilizó como combustible. No obstante el espejo, tornos y poleas fueron trasladados por



Regla de platino de Carlos Ibáñez Ibero

los astrónomos a un lugar más seguro, la casa de un comerciante llamado Brugada. El edificio quedó parcialmente destruido. En el año 1851 la reina Isabel II reinaugura el Observatorio pero sin la presencia del gran telescopio.

Con todo esto 200 años después de su primera instalación, en el año 2001, el Instituto Geográfico Nacional inició el proceso para hacer una réplica exacta del telescopio de Herschel. La construcción, muy meticulosa, se

realizó utilizando madera de roble en los astilleros de Bermeo (Vizcaya), además del montaje de las piezas y las primeras pruebas de eficacia. Desmontado, se trasladó al Real Observatorio de Madrid (ROM) en 2004, y se inauguró en 2010, coincidiendo con la finalización de las obras de acondicionamiento de los edificios y la construcción de un nuevo pabellón acristalado, donde se aloja el famoso telescopio.

• Sala de las Ciencias de la Tierra y el Universo

Incluye la maravillosa colección de instrumentos de Astronomía, Geodesia y Geofísica, de los siglos XIX y XX. Entre ellos cabe destacar diversos sismógrafos, los primeros planos cartográficos del Observatorio pero sobre todo la regla diseñada por el general de Ingenieros Carlos Ibáñez Ibero.

Se trataba de una regla de platino de aproximadamente cuatro metros. El proceso de medida consistía en ir desplazando la regla, alineándola con la dirección de la base repitiendo las mediciones sucesivamente.

Se utilizó a partir del año 1858 para cartografiar el territorio nacional empezando por Madridejos (Toledo). Fue la base de la moderna cartografía nacional y el instrumento fue “la envidia” de los países europeos de manera que británicos, franceses y alemanes fabricaron reglas semejantes.

Foto de 1855. Primeros trabajos con la regla de Ibáñez Ibero en Madridejos



Diagrama de evolución estelar

Isidoro González Navarro

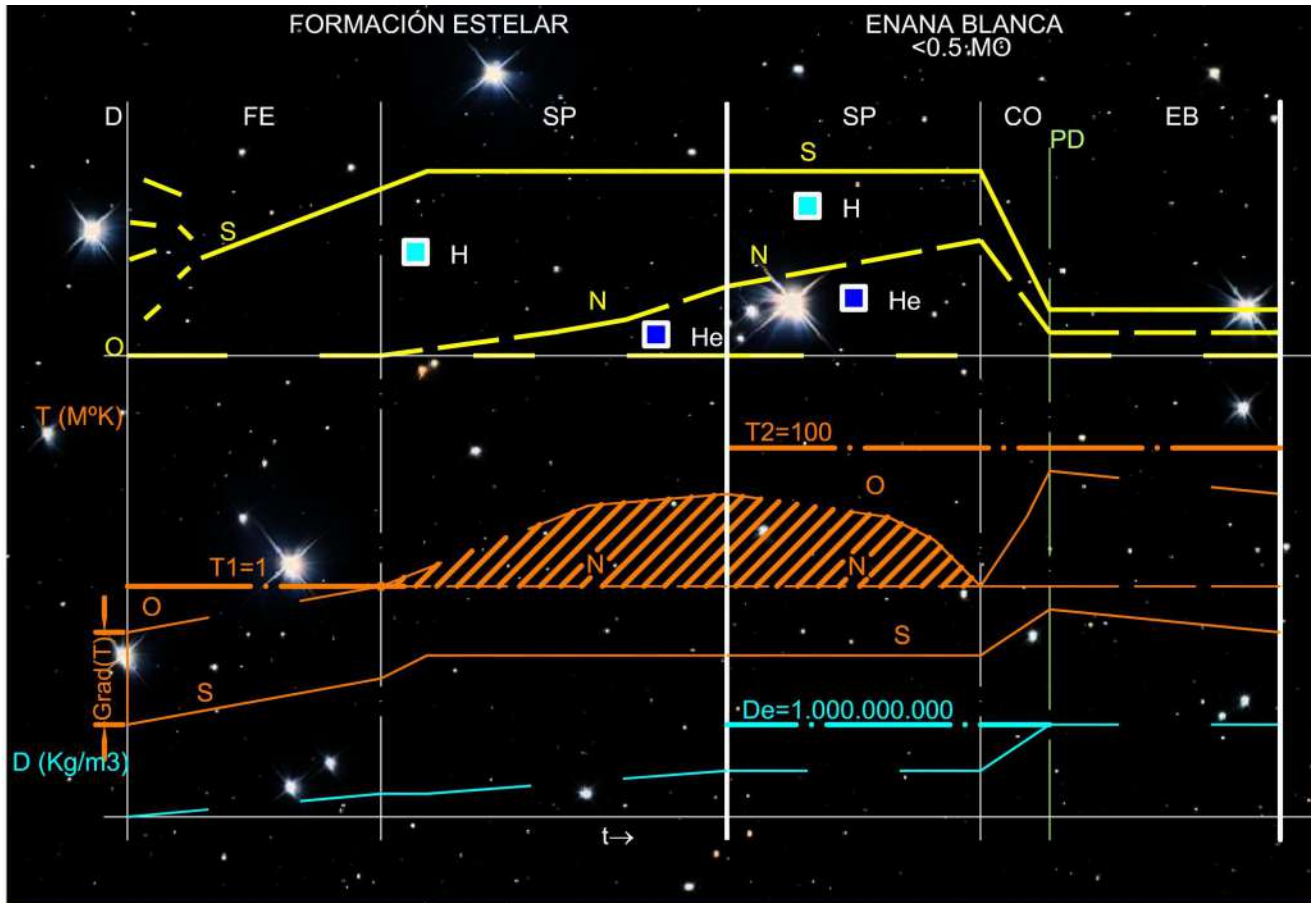


FIG 1

Cuando se intenta una explicación más o menos didáctica de la evolución estelar y las diferentes fases de una estrella a lo largo de su existencia, son varios los problemas que se presentan. Por un lado hay una variada casuística, afortunadamente reducida, dependiendo de la masa inicial de la estrella, y así tenemos gigantes efímeras muy calientes, enanas blancas, gigantes y supergigantes rojas, pequeñas estrellas marrones y abundantes anónimas que no se hacen notar dentro del enjambre de la llamada secuencia principal del diagrama H-R.

Este artículo pretende unificar, en lo posible, la descripción de los procesos que resultan decisivos en las diferentes fases de la vida de una estrella, presentando en un mismo diagrama tres de las variables a considerar: diámetro, temperatura y densidad, en cada uno de los tres escenarios posibles en función de la masa inicial de la estrella.

He omitido algunas complejidades inherentes a los procesos implicados en las diferentes fases, así como las diferentes escalas en la línea de tiempo para cada uno de los escenarios contemplados. Todo ello intentando mantener un pretendido carácter didáctico, resumiendo en un mismo esquema el comportamiento de la estrella en sus transiciones de fase sobre densidades, temperaturas y diámetros.

1. Introducción al diagrama de evolución estelar (Fig 1)

En el eje de abscisas siempre tendremos la línea de tiempo. En él podremos segregar toda la vida de la estrella en **fases** y además podremos reflejar instantes determinados de tiempo que dará lugar a sucesos determinantes en la vida de la estrella.

En el eje de ordenadas pondremos 3 valores, repartidos en 3 **campos**, a saber:

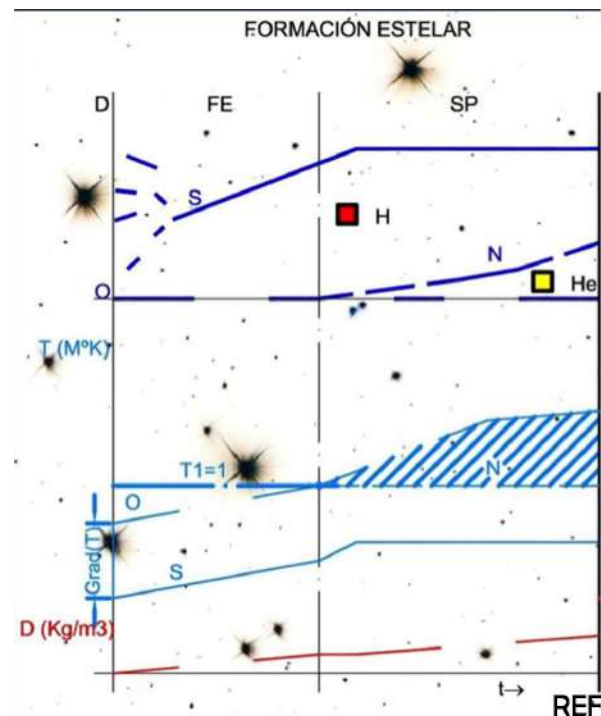
D: **Campo de Diámetros**: ya sea de la superficie de la estrella o del núcleo o los diversos núcleos que se formen. Se considera el núcleo de la estrella como el lugar geométrico dentro del cual se producen las reacciones de fusión. Se reservará la palabra S para referirnos al diámetro de la superficie y la palabra N para referirnos al diámetro del núcleo.

T: **Campo de Temperaturas**: se reflejará la temperatura en forma de gradiente. Normalmente tendremos dos líneas, la línea O, que reflejará la evolución temporal de la temperatura en el centro de la estrella, y la línea S que reflejará la temperatura en su superficie. Igual que en el caso anterior, también aparecerá una línea N para referirnos a la temperatura en la envoltura del núcleo.

D: **Campo de densidad**: igual que la temperatura, se reflejará únicamente la densidad en O, es decir en el centro de la

estrella ya que el resto de densidades, siempre menores, no van a tener relevancia en las conclusiones que se obtienen con este diagrama.

2. Fase de formación estelar y secuencia principal



La **Fase de Formación Estelar** denotada por FE, empieza en el momento en el que los átomos de H se van juntando por la atracción gravitatoria. Por eso al principio la línea de diámetros S aparece dispersa, hasta que llega un momento en que podemos hablar de una bola de gas con un diámetro determinado que va aumentando conforme se va agregando masa gaseosa.

Vemos en el campo de temperaturas, como el gradiente va aumentando: O siempre mayor que S. Lo mismo pasa con la densidad en el centro, que poco a poco va tomando valor.

Esta situación va evolucionando hasta que llega un punto en el que la temperatura en O supera el umbral T1, que es la temperatura en la que los núcleos de deuterio pueden empezar a fusionarse en núcleos de Helio: 1.000.000 K. La estrella se enciende. En ese momento pasamos a la siguiente fase evolutiva: la de **Fase de Secuencia Principal**

Denotada por SP, esta es la fase en la que la



estrella permanecerá a lo largo de la mayor parte de su vida. Mientras estamos en la secuencia principal, la enorme presión gravitatoria debida a la masa de la estrella se compensa con la presión de la radiación emitida por la fusión, y la estrella brilla durante eones.

En el diagrama se representa la actividad de la fusión con el rayado. Vemos que la temperatura en O sigue aumentando con una pendiente mayor, y lo mismo pasa en S. También vemos que disponemos una nueva línea de temperaturas, denotada por N y que representa la temperatura en la envolvente del núcleo. Es horizontal porque es constante, ya que siempre será T1 ya que: debajo de ella hay fusión y encima de ella no la hay.

En el campo de diámetros, reflejamos mediante la línea N el diámetro de la envolvente del núcleo. Por encima de ella tendremos átomos de H. Por debajo, átomos de He en estado de plasma.

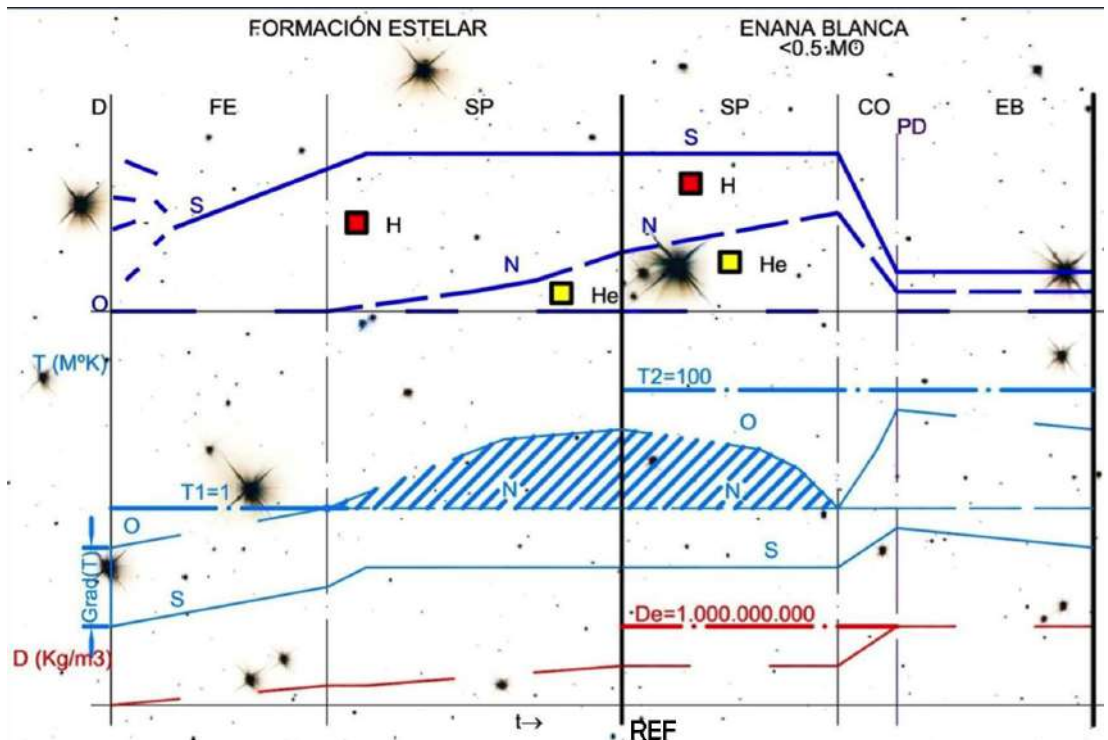
Mientras la densidad continúa en aumento, cuando se alcanzan los 10.000.000 K da comienzo la reacción protón-protón: la fusión del protio.

Llegados a este punto, la estrella todavía no se ha estabilizado ya que seguirá acopiando masa de la nube de gas germinal. Entonces, dependiendo de la magnitud de esa masa, la estrella evolucionará de formas diferentes. Representamos ese punto como la línea vertical REF.

3. Estrellas menores de 0,5 masas solares

Conforme vamos avanzando en la línea de tiempo a partir de REF, llega un punto en el que la nube de gas se agota y ya no se produce más acreción. La estrella no va a crecer más. Es cuando sí que alcanzamos el equilibrio entre la gravedad y las fuerzas de radiación nuclear.

La condición de que la masa sea inferior a 0.5



masas solares, hace que en el centro de la estrella no se alcance la temperatura de fusión del He. En el diagrama la denotamos por $T2=100.000.000$ K.

En esta situación, se estabilizan diámetros, densidades y la temperatura superficial S. No así la temperatura en O que sigue aumentando mientras haya reacciones de fusión. Sin embargo, toda vez que el combustible se va agotando, su pendiente va disminuyendo. Poco a poco la estrella se va "envenenando de Helio". Llega un momento que la curva de S en vez de ser ascendente, es descendente. El resto de magnitudes continúan estables.

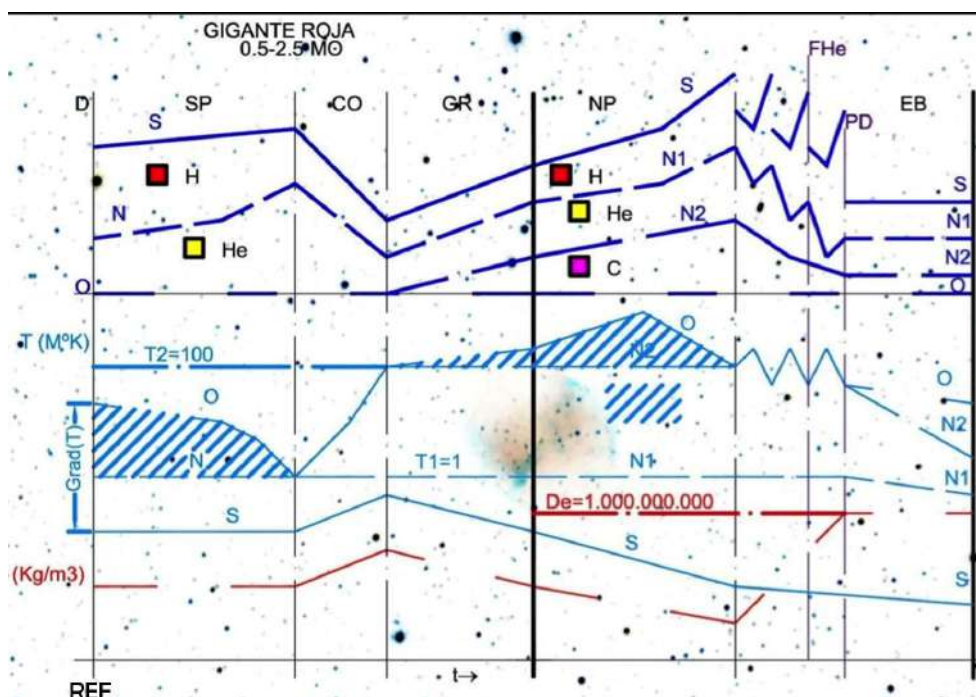
Cuando ya se ha agotado todo el H del núcleo, la estrella se apaga. Entonces es cuando

las fuerzas gravitatorias no tienen oposición. La estrella entra en la **Fase de Colapso**. En el diagrama vemos durante esta fase, denotada por CO, como los diámetros S y N menguan; como el gradiente de temperaturas aumenta sin llegar a alcanzar T2 y como aumenta ostensiblemente la densidad central.

El final de este colapso estará determinado por el valor de la densidad degenerada de los electrones, que se produce en el instante PD, a una densidad $De=1.000.000.000 \text{ kg/m}^3$. Es entonces cuando entramos en la **Fase de Enana Blanca**, fase denotada en el diagrama por EB.

Esta fase vuelve a estar en equilibrio. La estrella, formada por un plasma de átomos de He ionizados, bañados por una sopa compacta de electrones, estará muy caliente y estará emitiendo energía durante un tiempo mayor que el tiempo del Universo actual. Su temperatura superficial puede rondar los 200.000 K y gira rápidamente. En el diagrama se refleja como el gradiente de la temperatura disminuirá lentamente, hasta llegar a su fase final: la muerte térmica, la hipotética Enana Negra.

4. Estrellas menores de 2,5 masas solares



Continuamos desde la línea REF. Ahora la diferencia con respecto al caso anterior es que el acopio de masa es mayor y continúa durante más tiempo. Pero eso no quiere decir que las condiciones de presión y temperatura del núcleo cambien sustancialmente ya que el acopio de

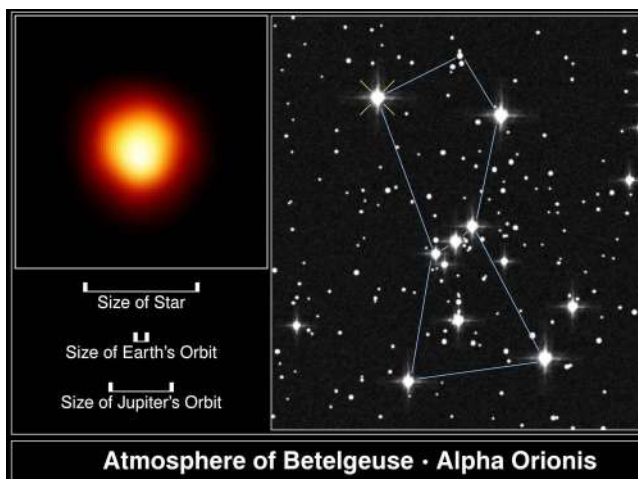


materia se produce en la superficie. Únicamente, al aumentar la presión gravitatoria, el núcleo se puede comprimir más y en la envoltura se fusiona a más velocidad. Por eso aumenta la pendiente de N. No obstante, llegaríamos tarde o temprano a la misma situación anterior de envenenamiento de He del núcleo: la temperatura alcanza un máximo y empieza a disminuir de nuevo. Cuando la temperatura en O alcanza de nuevo T1, la estrella se apaga.

Nuevamente asistimos al colapso CO: al terminar el combustible en el núcleo, la presión gravitatoria hace que se constriña éste. La diferencia con respecto al caso anterior es que, como la estrella es más grande, está más tiempo colapsando y aumentando más la temperatura en O. Entonces sí que alcanzamos el valor de $T2 = 100.000.000 \text{ K}$ y comienza la reacción tripe alfa del Helio para transformarse en Carbono. La estrella vuelve a encenderse.

Reflejamos en el diagrama en el campo de temperaturas una nueva superficie rayada. Y además se forma un nuevo núcleo de Carbono. Su envoltente la llamamos N2.

Al comenzar de nuevo en el núcleo la presión radiativa y toda vez que ahora hay más H que antes, se produce una rápida expansión de las capas exteriores de la estrella. Esto es así porque, la gravedad no es tan grande a pocas profundidades desde la superficie. Entramos en la **Fase de Gigante Roja**, denotada por GR. Vemos en el diagrama como aumentan los diámetros S, N1 y N2.



En cuanto a las temperaturas, aumenta en O, N1 y N2 deben permanecer constantes y sin embargo la que disminuye es S. Esto es así debido a lo comentado anteriormente: el aumento de diámetros produce un alejamiento de la superficie y consecuentemente un enfriamiento. La superficie se queda a escasos miles de K. La gigante roja brilla con luz rojiza, de baja temperatura. Pero brilla mucho, porque es muy grande. No pasa lo mismo en el núcleo que sigue fusionando y aumentando su temperatura.

En cuanto a la densidad también disminuye, al aumentar el volumen.

Observemos en el diagrama otra superficie rayada en el campo de temperaturas. Con eso queremos dar a entender que en la envoltente N1 se produce un aumento de temperatura suficiente para sobrepasar de nuevo T1 y

comenzar otra vez la fusión de Hidrógeno. De manera que tenemos dos fusiones a la vez. Ello hace que la expansión de las capas externas sea aún mayor.

Entramos en una nueva fase: la **Fase de Nebulosa Planetaria**, denotada por NP. Mientras se produce esta expansión acontece lo siguiente: la fusión de Helio no emite tanta energía como la del Hidrógeno, con lo que en términos relativos la estrella emite menos energía. Esto hace que cuando la estrella ha alcanzado un diámetro determinado, el núcleo vuelva a enfriarse. Es decir O baje de T2 y N1 de T1. Al apagarse la estrella de nuevo, las partes externas se enfrían y se contraen. Pero esta contracción es tan rápida, que gran parte de la capa exterior de la estrella que ya de por sí tiene muy poca densidad, se expulsa, se pierde. Comienza así la formación de la nebulosa planetaria.

Entonces empieza un proceso iterativo: al contraerse de nuevo el gas que no ha sido expulsado, vuelve a aumentar su temperatura, con lo que el Helio y el Hidrógeno cercano al núcleo vuelven a fusionar a un gran ritmo, mayor que el anterior. Es el fenómeno conocido como Flash de Helio. Entonces volvemos a expandir aún más la estrella. Hay que tener en cuenta que ya no hay tanta masa como antes. Pero de nuevo, al disminuir otra vez la fusión, vuelve a contraerse. Y así reiteradamente. En cada ciclo, va perdiendo más y más masa y cada vez hay menos H y He.

En el diagrama dibujamos el proceso iterativo con una serie de escalones en los que vamos viendo la oscilación de diámetros de núcleos, temperaturas y densidades.

En el campo de diámetros, vemos que la oscilación de éstos va disminuyendo conforme se va aportando masa a la nebulosa.

En el campo de las temperaturas, sin embargo, la oscilación se mantiene horizontal. Esto es así porque en la medida que colapsan los gases, la estrella se calienta por la ecuación de los gases perfectos; pero al calentarse y comenzar de

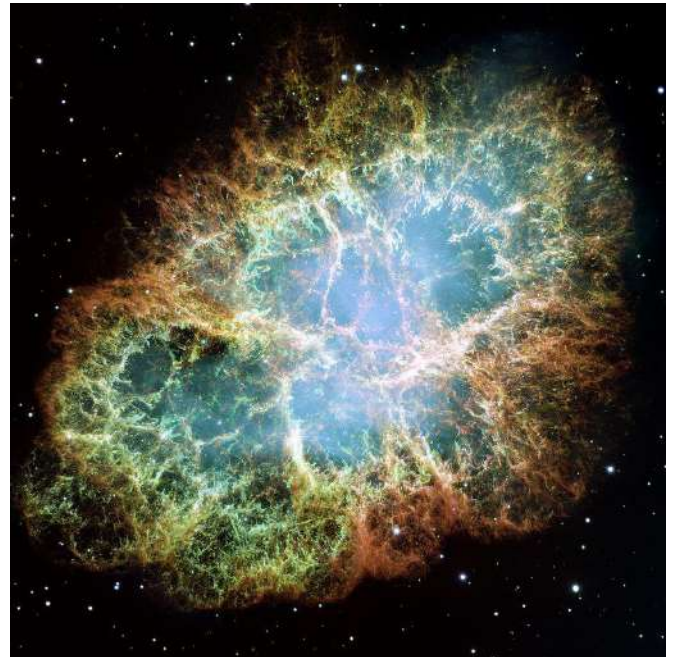
nuevo las reacciones nucleares, se expande y se enfría. Durante un tiempo la estrella estará escupiendo material gaseoso de forma pulsante. No solo H y He, también trazas de C. El fin de estos espasmos nos lo va a dar el campo de densidades:

Vemos como la densidad de O no deja de aumentar. Esto es así porque el balance de presiones siempre es favorable a la gravitatoria. El núcleo se contrae cada vez más y éste no pierde masa. Solo pierde las capas externas. Entonces, aumentando la densidad, alcanzaremos de nuevo la densidad degenerativa PD.

Y volveremos a entrar en fase de EB con una gran nebulosa de gas alrededor. Con una sutil diferencia respecto a la EB anterior.: el plasma en vez de estar formados por átomos de He estarán formados por átomos de C, que conforme se vayan enfriando irán cristalizando: tendremos un diamante en bruto de tamaño planetario. Eso es lo que le pasará al Sol.

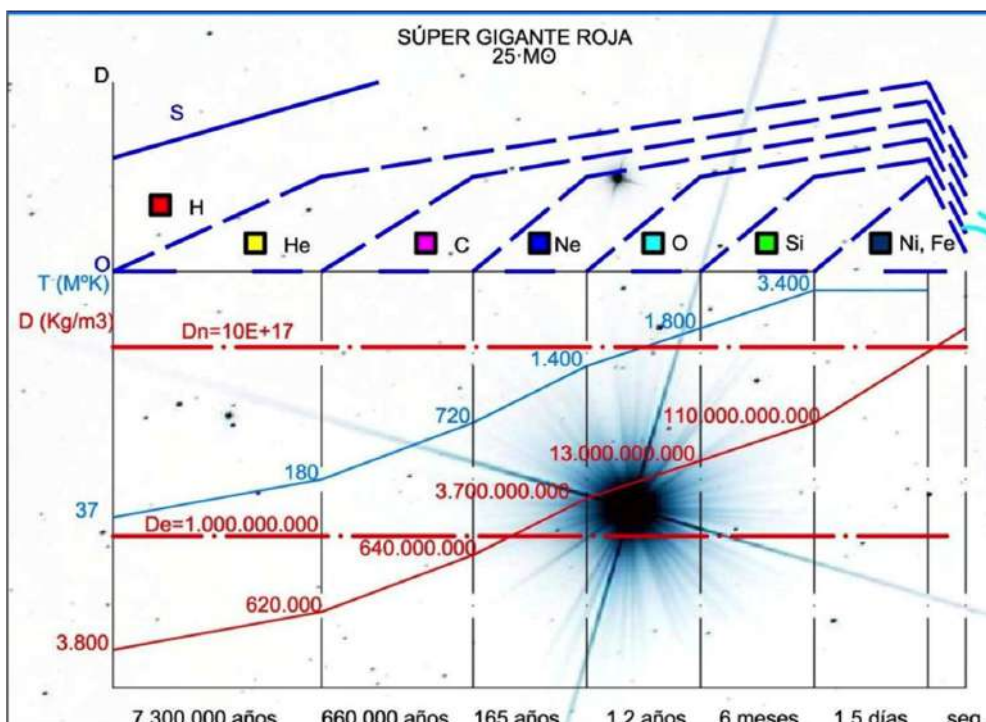
5. Estrellas mayores de 2,5 masas solares

Para una estrella de mayor masa, pongamos por ejemplo 25 soles, aparece la



nucleosíntesis estelar de distintos elementos:

Partimos ahora de un diagrama simplificado, para que pueda ser inteligible. Aquí vemos cómo se van formando las distintas capas de los elementos producto de las distintas reacciones de fusión que se van produciendo hasta llegar al Hierro. Aquí tenemos valores fidedignos de temperatura, tiempo y densidad, aportados por los modelos de estructura estelar. La estrella alcanza diámetros mucho mayores que los estudiados hasta ahora.

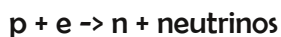


El hierro es el elemento químico con la mayor energía de enlace por nucleón. Esto significa que la fusión no libera energía, sino que la absorbe. Es una reacción endotérmica, no exotérmica. Es la auténtica ceniza de la estrella. Se vuelve a apagar la estrella y de nuevo empieza el colapso gravitatorio. Como quiera que

estamos hablando de masas muy grandes, el colapso será mucho más violento.

Al apagarse la estrella, ésta se colapsa a velocidades relativistas. Se habla de un 23% de c , $T=10^{11}$ K. Eso hace que el núcleo, que ya alcanzó anteriormente la densidad de degeneración de los electrones D_e , continúe emitiendo más y más rayos gamma.

Pero la estrella es tan enorme que se vuelve opaca a esta radiación, con lo cual la energía no puede salir. Nos encontramos entonces con las condiciones de presión y temperatura suficientes para alcanzar el límite de Chandrasekhar. Entonces dicha energía hace que los núcleos de hierro se desintegren en He y neutrones libres. Es la desintegración beta invertida:



El núcleo se convierte en un plasma de neutrones con la densidad del núcleo atómico. En el diagrama mostramos el valor de esa densidad $D_n = 4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$.

Ese núcleo se convierte en una pared extremadamente indeformable, de manera que el resto de las partículas que recordemos, avanzaba hacia el centro a velocidades relativistas, sufran un choque perfectamente inelástico al llegar a la envoltura del núcleo. El material sale disparado hacia afuera, a velocidades de un 15% de c .

Pero además hay otra cosa: además de radiación gamma se produce una gran emisión de neutrinos. Sabemos que estos no pueden



interaccionar con la materia, pero la estrella tiene tanta masa, que una pequeña proporción de estos sí es absorbida.

Estas dos circunstancias nos llevan a cumplir las condiciones para producir una supernova de tipo II. El balance energético dicen que puede ser 10^{46} J.

Todo se desprende al espacio excepto el núcleo, que se convierte en una estrella de neutrones. La supernova brilla más que su propia galaxia. De hecho, aumenta su magnitud en 20. La energía es tan grande que se crean elementos pesados como el oro, aluminio, ...

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

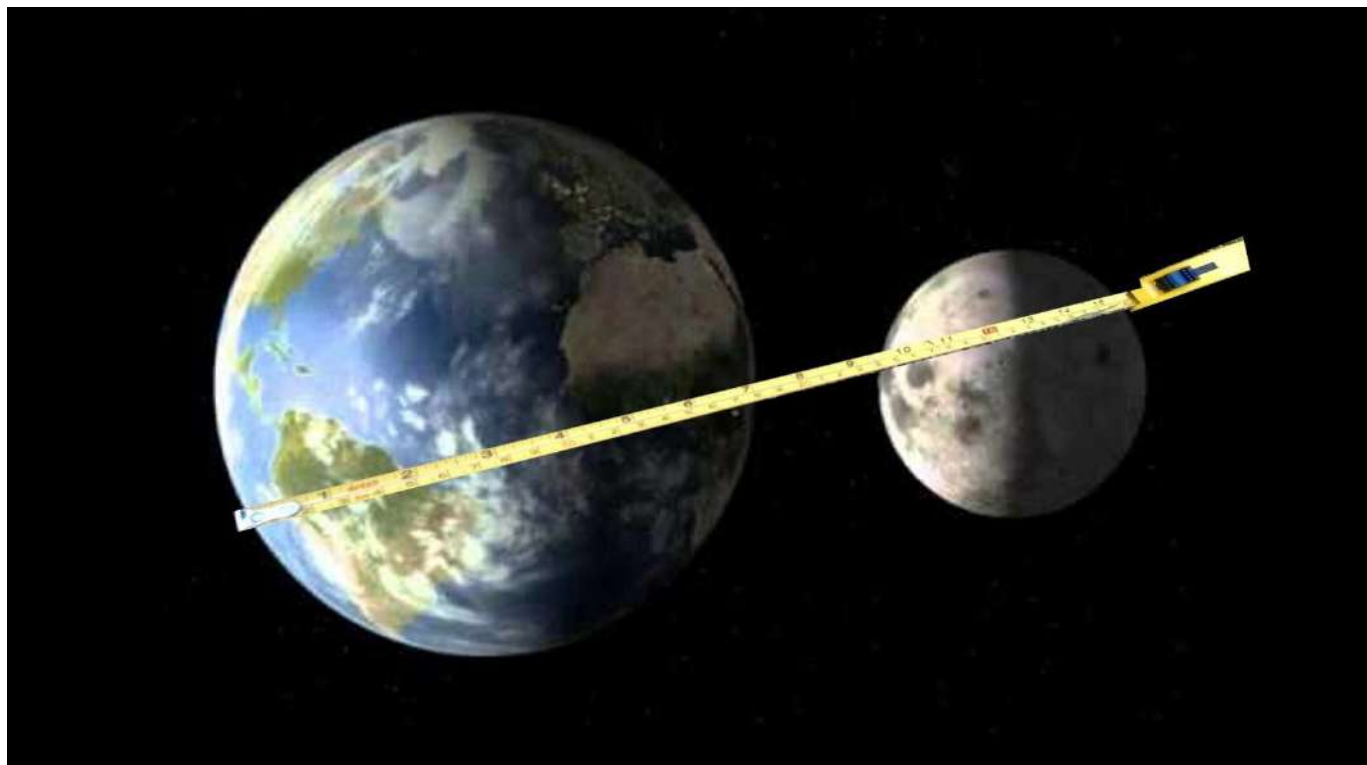
“Atlas de Astronomía” – Ed. National Geographic

“Evolución estelar” – Eduardo Battaner – Ed. National Geographic

“La vida privada de las estrellas” – Pedro Gómez Esteban (blog ‘el tamiz’)

Midiendo la Luna

Esteban Esteban Peñalba



Después de la conocida experiencia de medir la Tierra por el método de Eratóstenes, en alguna de sus diferentes variantes, el que el alumnado pueda calcular también por sus propios medios el tamaño de su satélite puede ser muy motivador e instructivo.

También en el caso de la Luna mi propuesta es seguir líneas similares a las que históricamente se utilizaron para medirlo (Aristarco de Samos en el siglo III A.C.), aunque en este caso se utilizará la fotografía, que evidentemente no estaba en las manos del sabio griego y nos permitirá solucionar algunos inconvenientes importantes con los que él se encontró.

De hecho el método de Aristarco en principio parece correcto pero tiene algunas pegas, como el suponer que la sombra de la Tierra es cilíndrica (al menos tal como se narra en muchas publicaciones), que no afecta excesivamente al resultado porque solo se

trataba de una estimación, y como tal es válido, pero hay que señalarlo en una explicación didáctica.

La idea es utilizar un eclipse de Luna:



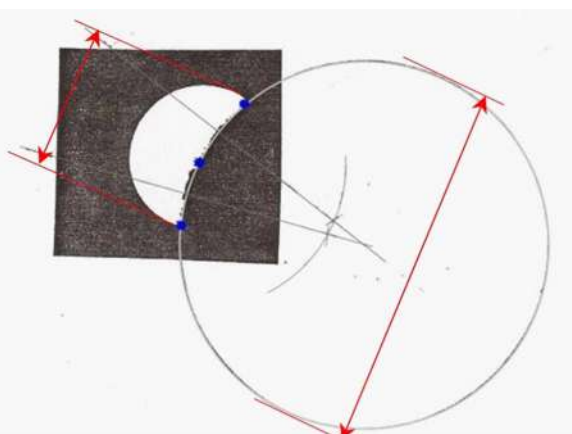
Eclipse del 27-7-2018 al final de la totalidad. Para tomar los datos hay que hacerlo antes o después de esta fase, durante el eclipse parcial

En el eclipse lunar nuestro satélite pasa por el cono de sombra de la Tierra. Si durante la fase parcial del eclipse comparamos el tamaño

de la Luna con el de la sombra de la Tierra, que deducimos del arco de circunferencia que se aprecia en la superficie de la Luna, a partir del tamaño de la Tierra que ya tenemos calculada, se puede calcular el de la Luna.

Parece ser que Aristarco lo hizo utilizando los tiempos en que la Luna tardaba en entrar totalmente en la sombra de la Tierra y lo que tardaba en atravesar toda la sombra. Pero este método no es válido en cualquier eclipse porque cambia mucho de unos a otros según la trayectoria y la profundidad del camino que siga la Luna, y habría que tomar el de mayor duración. Yo propongo utilizar una fotografía que siempre servirá.

A partir del arco de la sombra de la Tierra



en la foto se puede completar la circunferencia entera por métodos de dibujo técnico usando un compás, como se representa en el siguiente gráfico: A partir de 3 puntos siempre se puede dibujar la circunferencia, tomando las mediatrices de dos segmentos determinados por esos puntos (en el gráfico marcados en azul). El punto de corte de dichos segmentos es el centro de la circunferencia.

Si no se tiene soltura en trazar estas líneas, puede hacerse como lo hacían mis alumnos que no se esmeraban mucho: dibujar y recortar varios círculos de papel de varios tamaños, y elegir el que mejor se ajuste a la circunferencia del borde de la sombra terrestre.

La imagen que he puesto corresponde a un

eclipse del 29-11-1993 de madrugada, el primer año que hice el ejercicio con mi alumnado, y que algunos de ellos habían estado en la observación. En este gráfico se mide y calcula la proporción del tamaño de los dos círculos (el de la luna y el de la sombra de la Tierra).

Tal como se puede comprobar en el gráfico, se obtienen unos diámetros de 10,4 y 4,1 cm con la ampliación que me da el tamaño de la imagen. Divido: $10.4/4.1=2.54$

Esta sería la proporción entre el tamaño de la Tierra (ya calculado) y el de la Luna, suponiendo que la sombra de nuestro planeta mantuviera el tamaño de éste (fuese un cilindro). Lógicamente no es así porque la fuente de luz que produce esa sombra (el Sol) es mucho más grande (y por ello

es un cono) ¡Pero también está muy lejos! ¿es un cono muy puntiagudo o no?

Hay una manera de saber aproximadamente en cuanto se reduce esa sombra de la Tierra a la distancia de la Luna, que se deduce del hecho

de que vista la Luna desde aquí tiene un tamaño angular igual al Sol, o que en un eclipse solar el cono de sombra de la Luna prácticamente tiene su vértice en la superficie terrestre. A veces un poco más o un poco menos y por eso hay eclipses anulares y totales.

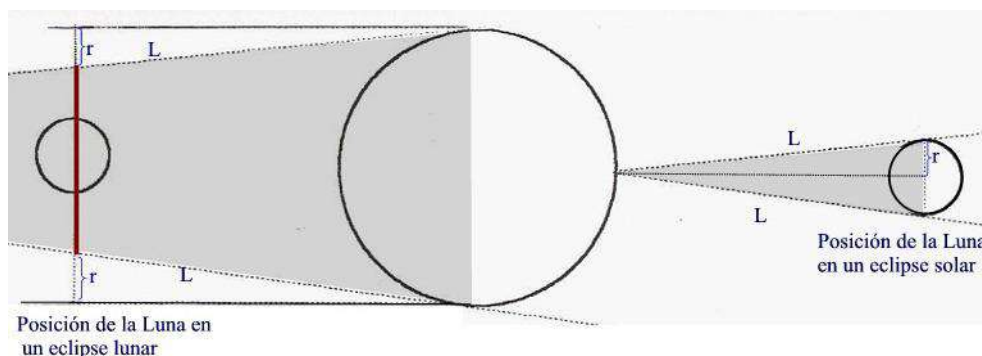
En el gráfico de la página siguiente se ilustra.

Como el Sol está mucho más lejos que la Tierra (y que la Luna) las líneas que delimitan los conos de sombra (en el gráfico, L) de ambos astros son casi paralelas, y por ello la reducción del diámetro de la sombra de la Tierra cuando hay un eclipse es el doble del radio lunar ($2 r$) como se puede apreciar en la figura.

Siguiendo con mis cálculos, a esa escala la Tierra tendría un diámetro de $10.4+4.1=14.5$ y $14.5/4.1=3.54$.

La Tierra es 3.54 veces más grande que la Luna, y tomando el valor del radio terrestre calculado antes (6391 km) sale un radio lunar

matemáticas, y muchas veces el propio método lleva implícito un posible error que no se puede evitar



Representando las situaciones de un eclipse de Sol y otro de Luna se deduce que en éste último el cono de sombra terrestre se ha reducido un diámetro lunar ($2r$)

de $6391/3.54 = 1805$ km. El valor verdadero es de 1737 km por lo que el error es menor de un 5%.

De todas formas, incluso haciendo todo el método de manera exacta puede haber un error mayor.

Errores y valor didáctico

Cuando se plantean estas experiencias didácticas siempre hay alguien que opina que no tiene sentido tanto cálculo. Que si queremos saber cuánto mide la Tierra y la Luna lo podemos mirar en un momento en internet y nos ahorramos el trabajo. O una vez acabado el cálculo critica el que el resultado no sea exacto.

Evidentemente el objetivo no es obtener un resultado, sino aprender el método, conseguir llevarlo a cabo, motivar e incluso, si el valor obtenido es muy incorrecto, analizar qué hemos hecho mal y solucionarlo, porque se aprende mucho más de los errores.

Por otra parte hay que señalar que estos métodos no tienen por qué ser exactos aunque hagamos correctamente las operaciones

En este caso el factor más determinante es la distancia a la que se encuentre la Luna en el momento del eclipse. Debido al movimiento en su órbita nuestro satélite puede estar hasta un 7% más lejos o más cerca de la media. Es la circunstancia de la que tanto se habla con las “superlunas”.

Además la determinación exacta del borde de la sombra y el completar la circunferencia que se ajusta a ella no es fácil hacerlo con precisión.

Problemas en el método de Aristarco

Otro asunto es lo relativo a los relatos sobre las experiencias iniciales, en este caso de Eratóstenes o Aristarco. Se pueden encontrar diferentes versiones incompatibles con resultados ambos correctos, y a veces se intenta



El paso de 1 a 2 es proporcional al tamaño de la Luna y de 1 a 3 al tamaño de la Tierra. No es problema el aproximar la sombra por un cilindro, que didácticamente no es importante para entender el método, pero sí que se den unas medidas muy diferentes de las reales.

maquillar el resultado inventándose a posteriori los números para que todo salga extraordinariamente exacto, aunque lo más probable es que no fuera así.

Como ya he repetido, lo importante no es la exactitud del resultado sino el método en sí, y en todo caso la obtención de un valor aproximado en orden de magnitud.

A pesar de que no tiene la menor importancia, no me resisto a poner algún ejemplo de lo que se cuenta y cómo se cuenta:

En el cálculo del tamaño de la Luna por Aristarco aunque hay relatos y explicaciones muy detalladas y completas, en algunos lugares se supone que la sombra de la Tierra era casi cilíndrica y se miden los tiempos en que la Luna pasaba de la posición 1 a la 2 y de la 1 a la 3.

El punto 1 es cuando comienza el eclipse parcial, el 2 cuando comienza el total y el 3 cuando acaba el total.

A veces se dice que “Aristarco comprobó que la Luna tardaba 4 veces más en pasar de 1 a 3 que de 1 a 2, con lo que aproximadamente su tamaño es la cuarta parte”

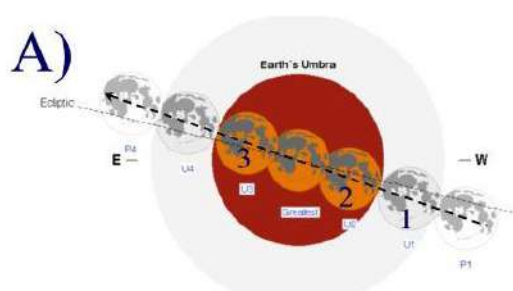
La conclusión sabemos que es cierta (no es muy diferente 4 o el valor real 3.7) pero en ningún eclipse tardará más de 2.7 veces más de 1 a 3. Se cambian los números para compensar el error en el diseño.

En otros casos se hace un planteamiento correcto con los conos de sombra pero se habla

de que Aristarco tomó los tiempos “en un eclipse” sin más. Pero los datos van a ser muy diferentes según el eclipse que se tome.

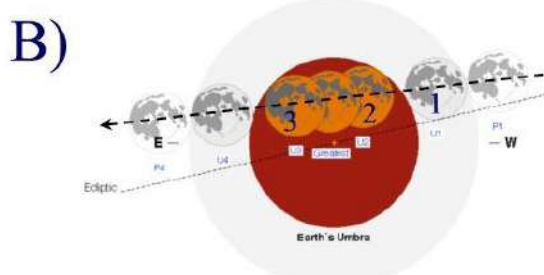
Debería ser un eclipse en que la Luna atravesara el cono de sombra de plano (como el de julio de 1953) y no casi rasante (como el de enero de 2019). Los tiempos son muy diferentes y sería mucha casualidad que hubiera tomado precisamente un eclipse adecuado, que es probable que en toda su vida no ocurriera ninguno. Con el método de la fotografía del eclipse parcial no surge este problema.

De todas formas también es posible que tanto Eratóstenes como Aristarco obtuvieran los resultados exactos, pero no es probable, ni es importante en absoluto. Lo realmente importante es que se plantearon la posibilidad de obtener esas medidas, que idearon unos métodos para calcularlas y aproximadamente obtuvieron el orden de esos tamaños, lo que supuso un gran avance en el conocimiento de la época. Esto es precisamente lo que convendría inculcar al alumnado, y motivarles haciéndoles ver que ellos también son capaces de obtener por sus propios medios esas medidas que en un principio pueden pensar que están fuera de su alcance.



26-7-1953

1- 10:33
2- 11:30
3- 13:11



21-1-2019

1- 3:34
2- 4:41
3- 5:43



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

