

Actividades sencillas de Astrofísica

Ricardo Moreno Luquero



Publicaciones de ApEA nº 5

ACTIVIDADES SENCILLAS DE ASTROFÍSICA

Ricardo Moreno Luquero

Publicaciones de ApEA

Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

No. 5 (Secundaria) - Junio 2003

Publicaciones de ApEA

Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

Dibujo de Portada: LeBlanc

Foto de portada: M13. Hubble, NASA, ESA

Comité de Redacción:

Simón García, Francesc Sánchez y Ederlinda Viñuales

Dirección:

Rosa M. Ros (Vocal Editora de Publicaciones de ApEA)

Departamento de Matemática Aplicada IV

Universidad Politécnica de Catalunya

Jordi Girona 1-3, módulo C3, 08034 Barcelona

e-mail: ros@mat.upc.es

ISBN: 978-84-932062-4-6

D.L. B-18981-2003

Imprés a FLAIX ÒFSET



Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	7
OBJETIVOS.....	9
OÍR LA VOZ DE JÚPITER.....	11
OBSERVACIÓN DE MICROMETEORITOS	13
CONSTRUCCIÓN DE UN ESPECTROSCOPIO	14
MEDICIÓN DE LA LUMINOSIDAD DEL SOL	15
ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA A LAS ESTRELLAS.....	17
ESTIMACIÓN DE LA MASA DE NUESTRA GALAXIA Y DEL NÚMERO DE ESTRELLAS QUE CONTIENE.....	19
MODELO DE CRÁTERES DE IMPACTO.....	20
MODELO A ESCALA DEL SISTEMA SOLAR.....	21
FABRICACIÓN DE UN MODELO DE NÚCLEO DE COMETA.....	24
UNA EXPLOSIÓN DE SUPERNOVA EN CLASE	26
MODELO DE AGUJERO NEGRO.....	30
EL UNIVERSO EN UNA GOMA ELÁSTICA	31
LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO.....	32
BIBLIOGRAFIA	34

PRESENTACIÓN

Un primer acercamiento a la Astronomía suele incluir el conocimiento de la bóveda celeste; el ritmo del Sol, la Luna y las estrellas; la confección de calendarios, relojes de Sol y algunos instrumentos más o menos sencillos, como el gnomon, el báculo de Jacob o el astrolabio.

Sin embargo, cuando el tema sale en los medios de comunicación, se suele hablar de conceptos de Astrofísica: agujeros negros, Big Bang, explosiones de supernovas, etc., que parecen requerir conocimientos elevados y complicados. Sin embargo, cuando se habla de conceptos básicos, cabe explicarlos con la sencillez que muestra la naturaleza. Heisenberg por ejemplo hablaba de *la simplicidad y belleza de los esquemas matemáticos que la naturaleza nos presenta*¹. Además, todo depende del nivel con el que se quiera tratar: siempre ha habido grandes divulgadores de la ciencia, y las grandes instituciones científicas dedican muchos recursos a hacer llegar a la sociedad el resultado de lo que hacen, para no quedar ellos atrapados en un coto cerrado.

Los profesores de Enseñanza Secundaria tenemos ahí un reto, si queremos estar a la altura de los tiempos. Un reto que supone profundización, inventiva y comunicación con otros de experiencias válidas. No es mía la cita: *Profesor: que te ilusione hacer comprensible a los alumnos, en poco tiempo, lo que a ti te ha costado horas de estudio llegar a ver claro*². Esa puesta al día lleva trabajo e ilusión, de las cuales sabemos mucho los que nos dedicamos a la docencia. Una vez oí decir a Juan Pérez Mercader, Director del Centro de Astrobiología, que su vida se podría resumir en *aprender para servir*. Creo que esa también es la razón que nos mueve a la mayoría de los profesores de enseñanzas medias. Pero si esa tarea te la facilitan otros compañeros con sus trabajos o experiencias, no cabe duda de que se puede llegar más lejos y más deprisa.

Con la intención de aportar un grano de arena en esa tarea, he recopilado aquí trece actividades en las que están involucrados, de forma sencilla, conceptos de Astrofísica. La procedencia de las actividades es muy variada: páginas de Internet, libros y revistas que se indican en la Bibliografía, algunas las he aprendido en los encuentros de la ApEA, y otras las he desarrollado con los alumnos en mis clases en el Colegio Retamar de Madrid, donde trabajo desde hace casi veinticinco años. Espero que sirva como material de trabajo, de la misma forma que las anteriores publicaciones de la ApEA, y que haya muchos más profesionales de la enseñanza que se animen a compartir lo que hacen con sus alumnos en estos temas, para que todos podamos aprender.

¹ Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*, Harper and Row, Nueva York 1971

² Josemaría Escrivá, *Surco*, n. 229, Rialp, Madrid 1991

OBJETIVOS

- Hacer estimaciones de algunos valores usados en Astrofísica: distancias a las estrellas, luminosidad del Sol o número de estrellas de nuestra galaxia.
- Hacer observaciones sencillas de temas complejos, como de las emisiones de radio de Júpiter, meteoritos que provienen de la formación del sistema solar o del espectro de emisión de gases calientes.
- Hacer modelos de algunos conceptos usados en Astrofísica: expansión del Universo, curvatura del espacio, distancias en el sistema solar, cráteres de impacto, núcleo de un cometa, o explosión de una supernova.

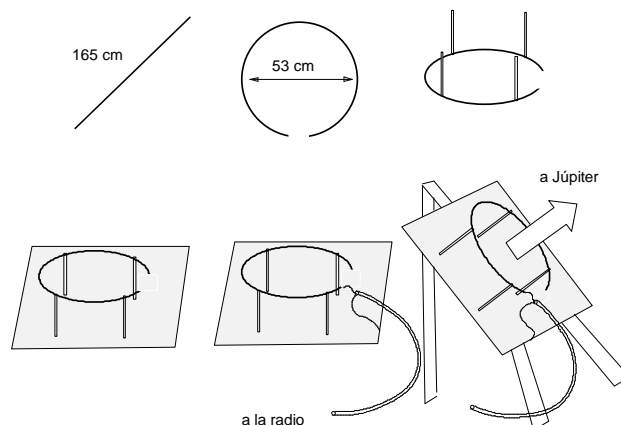
OÍR LA VOZ DE JÚPITER

Esta actividad la vi descrita en la revista *Sky & Telescope*³. El objetivo es escuchar una de las múltiples emisiones de radio del planeta gigante. El origen de esas emisiones no está claro, pero parece que tienen que ver con el potente campo magnético del planeta y con la rotación de su cercana luna IO. Las emisiones son en diversas frecuencias, pero una de ellas es en una zona cercana a los 21 MHz, en el rango de las radios domésticas. Se ha detectado que procede del interior de Júpiter, en tres chorros que giran con el planeta dando una vuelta cada 10 horas. Pero por alguna razón desconocida, esos chorros a veces están activos y a veces no. Para poderlas detectar desde la Tierra es necesario que uno de los chorros esté dirigido hacia nosotros, y además que esté activo, lo que requiere paciencia en la escucha.

Para oírlas necesitaremos una radio doméstica que tenga Onda Corta (SW) y que abarque hasta los 18 ó 22 MHz.

Un día (mejor una noche) en que esté Júpiter encima del horizonte, sintoniza la radio en algún punto cercano a los 21 MHz, mejor si no tiene mucho ruido de fondo, y espera. Las emisiones suenan como un viento racheado, o como olas de mar en una playa, con una frecuencia de una a tres por segundo aproximadamente. Su intensidad crece hasta un máximo que dura algunos minutos —o segundos a veces—, y después decae. Normalmente no se oye a la primera. Si estás a la escucha 20 minutos, tienes aproximadamente una probabilidad entre seis de oírla. Si no lo consigues, repítelo durante varios días.

La propia antena de la radio es adecuada, aunque es omnidireccional y captará ondas que procedan de todas las direcciones. En general basta con ella, pues es lo más sencillo. Pero si se quiere mejorar la escucha, y además asegurarse de que procede de Júpiter, se puede construir una antena direccional que sustituya a la normal. Se necesitarán 1'65 m de alambre de cobre rígido, cuatro palos de madera de unos 30 cm de largo, una plancha de madera de 60 x 60 cm, papel de aluminio y cable coaxial (del que se usa en las antenas de TV).



³ Revista *Sky & Telescope* nº 111, noviembre 1995, pág. 90. (Massachusetts, USA)

Se cogen 165 cm de alambre de cobre, y se hace una circunferencia con ella, sin cerrarla. Se sujeta a cuatro palos de 30 cm de longitud. Se forra una madera de 60 x 60 cm por una cara con papel de aluminio y se clavan en ella los cuatro palos que sujetan a la circunferencia de cobre. Se coge un cable coaxial de antena y se conecta el cable interior a la circunferencia de cobre, y la malla exterior al aluminio. El otro extremo se conecta a la antena de la radio. Por último, se dirige la antena hacia Júpiter.

OBSERVACIÓN DE MICROMETEORITOS

Cada día caen sobre la Tierra varias toneladas de pequeños meteoritos, que proceden directamente de la materia que dio origen al Sistema Solar, hace unos 4.500 millones de años aproximadamente. Son las llamadas estrellas fugaces, pequeños trozos de roca que al rozar con la atmósfera a decenas de miles de kilómetros por hora, normalmente se funden, y sus cenizas van cayendo lentamente sobre el suelo.



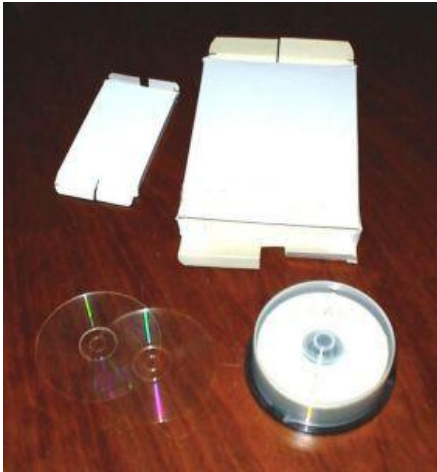
La mayor parte de los meteoritos son silíceos, y es difícil diferenciarlos del terreno que hay a su alrededor. Pero aproximadamente el 5 % de los meteoritos son metálicos, en especial compuestos de hierro y níquel, y se pueden separar de los granos de arena con un simple imán.

Por tanto es de esperar que si recogemos con un papel un poco de arena del suelo, haya varios micrometeoritos metálicos. Las mejores zonas para buscar son en las cunetas de las carreteras, en las canaletas de desagüe en tejados de edificios, etc; donde el agua de lluvia los arrastra y los junta. Si aplicamos un imán por la parte de atrás del papel y damos la vuelta a todo el conjunto, caerán todas las partículas excepto las de composición férrica, que probablemente serán micrometeoritos.

Si lo son, al observarse con un microscopio de unos 100 aumentos o incluso con una lupa binocular, se verán claramente las señales de fusión: forma redondeada, como pequeñas perlas esféricas, a veces con estrías longitudinales en su superficie. Algunos alumnos las comparan con canicas. Es importante iluminar las muestras no desde abajo, sino de forma lateral, para que se vea bien su brillo metálico y su color gris oscuro.

Más información en <http://education.jpl.nasa.gov/educators/micromet.html>

CONSTRUCCIÓN DE UN ESPECTROSCOPIO

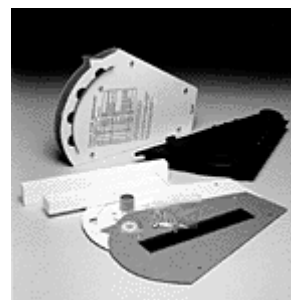


Hay una forma sencilla de construir un espectroscopio. Actualmente los fabricantes de "tarrinas" de CD grabables ponen un disco de plástico transparente en la parte inferior para proteger al último disco contra los arañazos. Ese disco resulta ser una estupenda red de difracción. Para construir el espectroscopio se necesita una caja de cartón: mejor si es plana, como la de una agenda o libro, pero también sirve una caja de zapatos, de sobres, etc. Con unas tijeras se recorta una rendija fina en un extremo, y en el otro se hace una abertura por

donde mirar. En esta última se pega la red de difracción: un trozo de ese "CD" de plástico transparente, con el "rayado invisible" vertical. Si se mira a través de esa abertura, haciendo coincidir la rendija de la caja con una lámpara de bajo consumo o un tubo fluorescente, se verán claramente a derecha e izquierda, separadas unos 30° de la rendija, las líneas de emisión de los gases que contienen esas bombillas. También se pueden mirar las luces naranjas (de sodio) o blancas (de vapor de mercurio) de las farolas de las calles. Las bombillas incandescentes tradicionales ofrecen un espectro continuo.

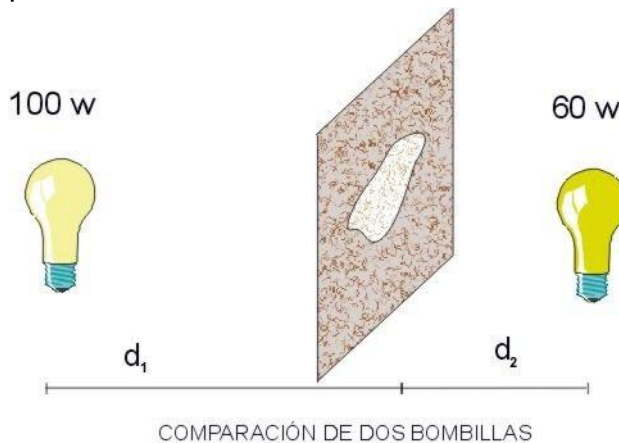


Una versión mejor, con una escala graduada para medir las líneas de emisión y una tabla para identificar esas medidas se encuentran a la venta en internet en <http://www.starlab.com/pspl.html>. Cuestan entre 8 euros (de cartón) y 22 euros (de plástico).

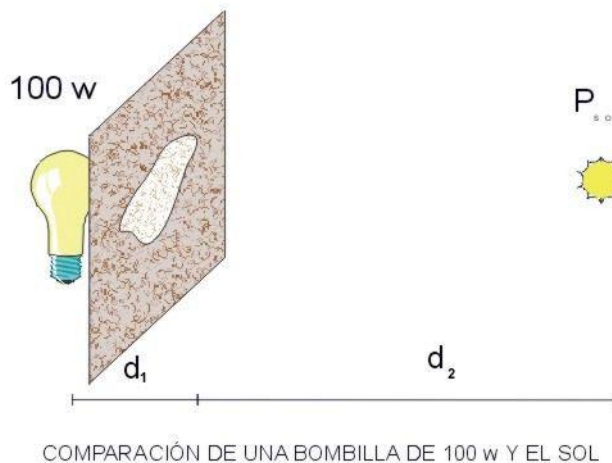


MEDICIÓN DE LA LUMINOSIDAD DEL SOL

En esta actividad se trata de comparar la luminosidad del Sol con la de una bombilla de 100 w. Para ello los alumnos deben construir un fotómetro *de gota de aceite*: en un trozo de papel (mejor de estraza, pero también vale un folio blanco) se deja caer una gota de aceite. La mancha que se produce hace al papel semitransparente en esa zona, mientras que en el resto es casi opaco al paso de la luz.



Si el papel se sitúa verticalmente entre dos fuentes luminosas de potencia P_1 y P_2 , podemos comparar la iluminación que le llega de un lado y de otro: si el papel es iluminado con más intensidad desde atrás, la mancha se verá brillante; mientras que se verá oscura si es más iluminada por la parte delantera. Si la iluminación es la misma por ambas partes, la mancha casi desaparecerá de nuestra vista, como si no existiese. En esa posición se cumplirá:



$$\frac{P_1}{(\text{distancia } 1)^2} = \frac{P_2}{(\text{distancia } 2)^2}$$

Dependiendo de la edad de los alumnos, esa expresión se puede razonar o simplemente comprobar que se cumple comparando varias bombillas de distinta potencia. Si el

profesor se anima a razonarla, se puede explicar que a una distancia d , la energía de cada bombilla se tiene que repartir entre la superficie esférica de área $4 \cdot \pi \cdot d^2$. Por tanto a cada centímetro cuadrado le llega una energía de $\frac{P}{4\pi d^2}$. Si la energía que le llega por ambas partes es la misma, la expresión mencionada es inmediata.

Si ahora comparamos el Sol con una bombilla de 100 ó mejor de 150 w, y sabemos que la distancia al Sol es de 150 millones de kilómetros, podemos

calcular la potencia del Sol. El resultado debe aproximarse a los $3'83 \times 10^{26}$ w reales.

Hay que tener en cuenta que estamos comparando la energía sólo en la parte de la radiación visible, y no tenemos en cuenta la radiación infrarroja por ejemplo. Pero los resultados que se obtienen son bastante ajustados al valor real, por lo que la energía emitida en la zona del espectro visible, tanto en bombillas incandescentes como en el Sol, debe ser representativa de la emisión total en los dos cuerpos.

ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA A LAS ESTRELLAS

Esta actividad se puede plantear como una continuación de la anterior. Se trata de fabricar una estrella artificial de potencia conocida y situarla a una distancia tal que se vea con el mismo brillo que una estrella real en el firmamento. Haciendo la suposición de que las estrellas son de una potencia similar a nuestro Sol, se puede aplicar la fórmula de la actividad anterior y hacer una estimación de la distancia a esa estrella.

Necesitaremos una linterna con una bombilla de potencia conocida. La potencia suele venir indicada en el casquillo de la bombilla, y si no fuera así el profesor tendría que medir la resistencia de la bombilla y calcular su potencia

con la fórmula $P = \frac{V^2}{R}$, donde V es el voltaje total de las pilas de la linterna. El dato de la potencia de bombilla habría que facilitársela al alumno.

La linterna se tapa con un papel de aluminio en el que se ha hecho un pequeño orificio con una aguja. La potencia que sale por ese pequeño agujero será una fracción de la potencia de la bombilla de la linterna. Dicha fracción es el cociente entre el área del pequeño orificio y el área de salida de la luz en condiciones normales de la linterna. Las dos áreas son aproximadamente circulares ($\text{Área} = \pi \cdot r^2$), y sólo hay que medir los radios respectivos. Para el de la linterna bastará una regla, pero en el caso del pequeño orificio en el papel de aluminio, habrá que medir el grosor de la aguja con la que se hizo. Se puede hacer con un calibre de precisión, pero también se pueden poner juntas varias agujas iguales, hasta que rellenen 1 cm de espesor, y así dividir 1 cm entre el número de agujas. Eso nos dará el diámetro, y dividiendo por dos obtendremos el radio.

Veamos un ejemplo.

DATOS:

$$P_{\text{sol}} \cong 4 \cdot 10^{26} \text{ w}$$

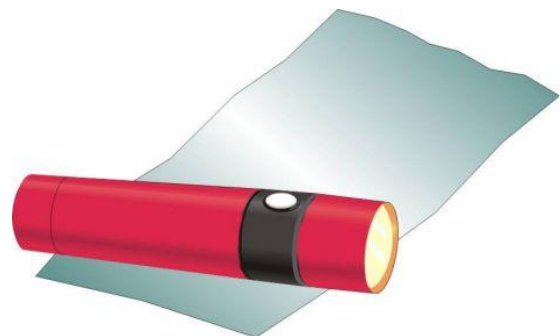
$$1 \text{ año-luz} \cong 10^{16} \text{ m}$$

$$P_{\text{bombilla}} = 1'5 \text{ w} \quad (\text{pone en el casquillo: } 0'5 \text{ A; } 3 \text{ V})$$

$$\text{Diámetro del foco de salida de la linterna} \\ = 7'3 \text{ cm} \quad (\text{radio} = 3'65 \text{ cm})$$

$$\text{Diámetro de la aguja (cabén 17 en 1 cm)} = 0'6 \text{ mm} = 0'06 \text{ cm} \quad (\text{radio} = 0'03 \text{ cm})$$

$$P_{\text{estrella artificial}} = P_{\text{bombilla}} \cdot \frac{\text{area del orificio}}{\text{area de la linterna}} = 1'5 \cdot \frac{\pi \cdot 0'03^2}{\pi \cdot 3'65^2} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ w}$$



Distancia típica a la que se ve la estrella artificial con el mismo brillo que una estrella de la Osa Mayor = 15 m

Suponiendo esa estrella de la misma potencia que el Sol y a una distancia d :

$$\frac{P_1}{d_1^2} = \frac{P_2}{d_2^2}$$

$$\frac{4 \cdot 10^{26} w}{d^2} = \frac{1 \cdot 10^{-4} w}{15^2}$$

$$d^2 = \frac{4 \cdot 10^{26} \cdot 15^2}{10^{-4}} = 9 \cdot 10^{32}$$

$$d = 3 \cdot 10^{16} m = 3 \text{ a.l.}$$

Hay que tener en cuenta que las estrellas que vemos más brillantes en el firmamento suelen ser bastante más luminosas que el Sol, como se ve en la siguiente tabla, y nosotros, en esta actividad, las suponemos iguales a él. Eso hace que salgan distancias menores a las reales. Pero el método sirve para estimar el orden de magnitud de esas distancias. Para afinar los resultados se podría aportar al alumno la potencia de la estrella, pero se sacrificaría sencillez al procedimiento.

ESTRELLAS MÁS BRILLANTES		
Nombre	Luminosidad (Sol = 1)	Distancia (a.l.)
SOL	1	-
Sirio	23'5	9
Canopus	80.000	1.200
α Centauri	1'6	4
Vega	50	26
Capella	150	43
Rigel	18.000	900
Arturo	100	40
Proción	7'6	12
Altair	9	17
Aldebarán	90	55
Antares	3.100	450
Pollux	28	50
Deneb	10.000	1.800

ESTIMACIÓN DE LA MASA DE NUESTRA GALAXIA Y DEL NÚMERO DE ESTRELLAS QUE CONTIENE

Para hacer esta actividad se requiere conocer la fórmula de la gravitación universal: $F = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2}$, y la expresión de la fuerza centrípeta

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot R = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot R$$

Las galaxias giran sobre sí mismas, también la nuestra. Gracias al efecto Doppler, se ha podido medir la velocidad a la que se mueven las estrellas más lejanas de nuestra Vía Láctea: dan una vuelta a la Galaxia cada 200 millones de años. Por otra parte, se estima en 100.000 años luz el diámetro de nuestra Galaxia (1 a.l.= 10^{16} m).

Si nos fijamos en una de esas estrellas exteriores, la fuerza de atracción gravitatoria es la fuerza centrípeta de su movimiento aproximadamente circular, por lo que:

$$G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot R$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

M = Masa de la Vía Láctea, que es lo que buscamos

m = masa de la estrella de la periferia, que se anula al estar en los dos miembros de la igualdad

R = radio de la Vía Láctea, en metros

T = tiempo en segundos que tarda la galaxia en dar una vuelta (1 año= $3.2 \cdot 10^7$ s)

El Sol tiene una masa de $2 \cdot 10^{30}$ kg. Si suponemos que es una estrella media, ¿cuántas estrellas se pueden estimar que hay en la Vía Láctea? Despejando M (la masa de nuestra Galaxia) en la expresión anterior:

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{T^2 G}$$

$$M = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot (50.000 \cdot 10^{16})^3}{(200 \cdot 10^6 \cdot 3.2 \cdot 10^7)^2 \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}} = 18 \cdot 10^{41} \text{ Kg}$$

$$M = \frac{18 \cdot 10^{41}}{2 \cdot 10^{30}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ estrellas} = 900.000 \text{ millones de estrellas}$$

Sale un poco alta esa cantidad, ya que estamos suponiendo todas las estrellas iguales al Sol. Además está la materia interestelar, la materia oscura, etc. Como otras veces, el cálculo sencillo nos sirve para estimar el orden de magnitud. Actualmente se cree que nuestra galaxia tiene 300.000 millones de estrellas.

MODELO DE CRÁTERES DE IMPACTO



Los meteoritos que impactaron hace millones de años con los planetas y con sus lunas produjeron los cráteres que se observan en la mayoría de ellos, por ejemplo en la Luna y en Mercurio. Los hay pequeños y semiesféricos, grandes y con un pico central, muy



grandes y con una cordillera en forma de anillo en su interior, etc. En los más recientes se distingue la "eyecta", material del interior que ha salido expulsado formando una especie de rayos que llegan bastante lejos.

De estos cráteres se puede hacer un modelo sencillo y bastante real con una bandeja llena de harina y puesta en el suelo. Previamente conviene extender papeles de periódico por debajo de la bandeja, para evitar manchar el suelo.

Se pone la harina en una bandeja, con un espesor de unos 2 ó 3 cm y se alisa la superficie con el borde de una regla.

A continuación se coge un poco de harina con una cucharilla y se deja caer sobre la bandeja desde una cierta altura. El impacto produce señales muy similares a los cráteres de impacto.

Se pueden hacer variaciones en la altura, la cantidad de masa del "meteorito" que impacta, etc., y estudiar cómo influye en la forma del cráter. También se pueden poner varias capas de material de distinto color (por ejemplo cacao encima de la harina) para simular la "eyecta" de los cráteres reales, en los que sale material del interior. En ese caso basta espolvorear con la ayuda de un colador, una fina capa de cacao por encima de la harina.



Si la capa de harina es gruesa (2 ó 3 cm), los cráteres salen del tipo semiesférico. Pero si la capa es de menos de 1 cm, la harina del "meteorito" rebota en el fondo duro de la bandeja, y sale un pico central similar a los cráteres reales del tipo medio. Faltaría ver cómo conseguir la forma de los cráteres grandes, con cordillera en forma de anillo en su centro.

MODELO A ESCALA DEL SISTEMA SOLAR

Los dibujos del sistema solar que aparecen en los libros no suelen estar hechos a escala, y, para que "salgan todos en la foto", las distancias entre los planetas no son las reales. Eso nos puede llevar a una idea del sistema solar muy distinta de la realidad, en la que casi todo es vacío.

Para acercarnos a esa realidad, vamos a construir un modelo a escala del tamaño y de la distancia de los objetos que componen el sistema solar.

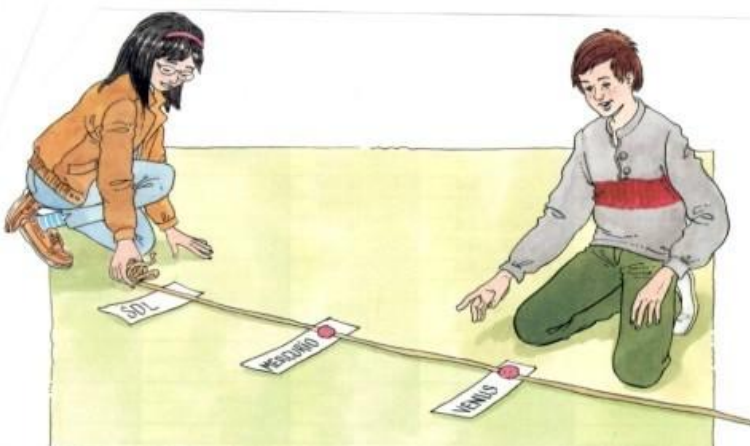
El material necesario es una cinta métrica o una regla, un rollo de cuerda fina (de al menos 60 m de longitud), papel celo y plastelina.

Con los datos de las dos tablas de las páginas siguientes, y un factor de escala de $1 \text{ cm} = 1.000.000 \text{ km}$, se convierten las distancias reales en distancias a escala, completando las columnas de la derecha. Se toma una cuerda cuya longitud sea la distancia a escala entre el Sol y Plutón, más unos 30 cm. Con esos centímetros de más se hace una esfera, cuyo diámetro sea el del Sol a escala, y se pega con papel celo. Se corta el resto de los 30 cm. En la cuerda, cerca de esa esfera, se pone una etiqueta que diga **SOL**.

A partir de ese **SOL**, se marca con el metro la posición de cada planeta en la cuerda, y se pega una etiqueta de unos 10 cm con el nombre del planeta. Si ese planeta tiene lunas, se dibuja en la etiqueta, a escala, la distancia de la luna más exterior.

Se puede intentar hacer con plastelina pequeñas esferas que representen a los planetas a esa escala, y pegarlas a la etiqueta del planeta correspondiente.

Con ello se completará el modelo del Sistema Solar.



El modelo construido sirve para apreciar las distancias y tamaños de las órbitas del Sistema Solar. Sin embargo, no se debe sacar la conclusión de que los planetas están alineados, sino que cada uno sigue su órbita independiente de los otros. De hecho, en los viajes interplanetarios se recorren distancias mucho mayores que las que aquí se representan, ya que no van en línea recta, aunque se aprovechan posiciones favorables de los planetas.

recorren distancias mucho mayores que las que aquí se representan, ya que no van en línea recta, aunque se aprovechan posiciones favorables de los planetas.

Con el modelo extendido en el suelo, se puede caminar a su lado a velocidad constante, medir los tiempos con un cronómetro y después preguntarse:

Si el Apolo XI tardó tres días en ir de la Tierra a la Luna, ¿cuánto se tardaría en ir a Marte? (el Viking tardó un año).

¿Cuánto se tardaría en ir a esa velocidad desde la Tierra a Júpiter? (El Voyager tardó 2 años). ¿Y cuánto crees que tardó el Voyager II en llegar a Saturno? ¿Y a Urano y Neptuno?

Ninguna nave ha llegado a Plutón. ¿Puedes calcular aproximadamente cuánto se tardará?

La estrella más cercana al Sol es Alfa-Centauro. Está 7.000 veces más distante que Plutón. ¿Cuánto se tardaría en llegar con la tecnología actual?

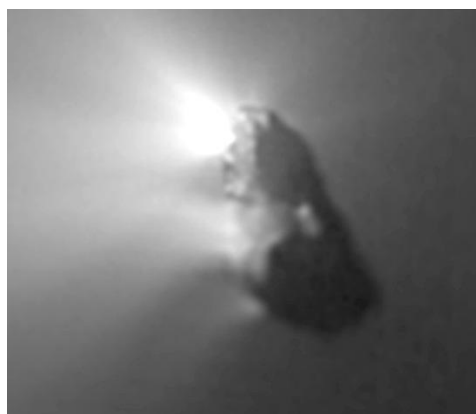
OBJETO	DISTANCIA AL SOL (km)	DIÁMETRO (km)	DISTANCIA A ESCALA (cm)	DIÁMETRO A ESCALA (cm)
SOL	-	1.390.000		
MERCURIO	58.000.000	4.880		
VENUS	108.000.000	12.100		
TIERRA	150.000.000	12.800		
MARTE	228.000.000	6.800		
CERES (asteroide)	420.000.000	1.000		
JÚPITER	780.000.000	143.000		
Diámetro del anillo exterior	-	261.000		
SATURNO	1.430.000.000	120.000		
Diámetro del anillo exterior	-	273.000		
URANO	2.870.000.000	51.000		
Diámetro del anillo exterior	-	100.000		
NEPTUNO	4.500.000.000	49.000		
Diámetro del anillo exterior	-	106.000		
PLUTÓN	5.900.000.000	2.300		

PLANETA Luna	DISTANCIA DESDE EL PLANETA (km)	DIÁMETRO (km)	DISTANCIA A ESCALA (cm)	DIÁMETRO A ESCALA (cm)
TIERRA	-	12.800		
Luna	400.000	3.480		
MARTE	-	6.800		
Fobos	9.400	21		
Deimos	23.500	12		
JÚPITER	-	142.800		
Anillo exterior	130.400	-		
Amaltea	180.000	170		
Io	422.000	3.630		
Europa	671.000	3.140		
Ganímedes	1.070.000	5.260		
Calisto	1.885.000	4.800		
SATURNO	-	120.000		
Anillo A	91.700 - 117.600	-		
Anillo B	121.900 - 136.300	-		
Mimas	187.000	390		
Encelado	238.000	500		
Tethis	295.000	1.060		
Dione	378.000	1.120		
Rhea	526.000	1.530		
Titán	1.221.000	5.150		
Hiperion	1.481.000	255		
Japeto	3.561.000	1.460		
URANO	-	51.200		
Anillo exterior	50.000	-		
Miranda	130.000	485		
Ariel	190.000	1.160		
Umbriel	266.000	1.190		
Titania	436.000	1.610		
Óberon	583.000	1.550		
NEPTUNO	-	48.600		
Anillo exterior	53.000	-		
Tritón	354.000	2.785		
Nereida	5.600.000	300		
PLUTÓN	-	2.300		
Caronte	20.000	1.200		

FABRICACIÓN DE UN MODELO DE NÚCLEO DE COMETA

Cuando aparece en el cielo un cometa que se puede ver a simple vista, como ocurrió en 1996 con el Hyakutake y en 1997 con el Hale-Bopp, su visión nos fascina y somos testigos de cómo un objeto del tamaño de una montaña pequeña es capaz de desarrollar una cabellera de muchos millones de kilómetros.

El núcleo de un cometa como el Halley no sobrepasa los 10 km. La sonda europea Giotto pasó cerca de su superficie en 1986 y lo fotografió, mostrando su forma irregular, y los chorros de gas que salían de su interior al calentar el Sol su superficie. El Hale-Bopp era más grande, de unos 40 km, y empezó a emitir chorros desde distancias muy lejanas del Sol.



El núcleo de un cometa se describe como "una bola de nieve sucia". Sus componentes principales son agua, CO y CO₂ congelados, mezclados con polvo silíceo y carbonáceo. También se han detectado en menor cantidad gases de amoníaco, algunos hidrocarburos, etc. Según se acerca al Sol, el agua y el CO₂ aumentan su temperatura y se volatilizan. Surgen desde el interior chorros de gas y polvo que el viento solar empuja en dirección opuesta al astro rey, formando la magnífica cola.

Vamos ver cómo se puede fabricar un modelo de núcleo de cometa que realmente se parece mucho a la realidad, y que resulta didáctico, vistoso y divertido. La "receta" está sacada de una página web educativa de la NASA: <http://education.jpl.nasa.gov/educators/comet.html>. Puedo confirmar que funciona, aunque el cometa dura sólo unas pocas horas.

El material necesario es:

Hielo seco (CO ₂): unos 2 kg Amoniaco: unas gotas Almidón en polvo: unos 5 gramos Agua: 2 litros Tierra oscura: 300 g Una cubeta grande de plástico Una toalla de tela Un plástico grande, por ejemplo una bolsa de basura Guantes aislantes (valen los de esquí)

Al trabajar con hielo seco hay que tomar dos precauciones: en primer lugar, como está a una temperatura de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, se debe manipular siempre con guantes aislantes, por ejemplo unos de esquí. Por otra parte, espontáneamente o al mezclarlo con agua se convierte en CO₂

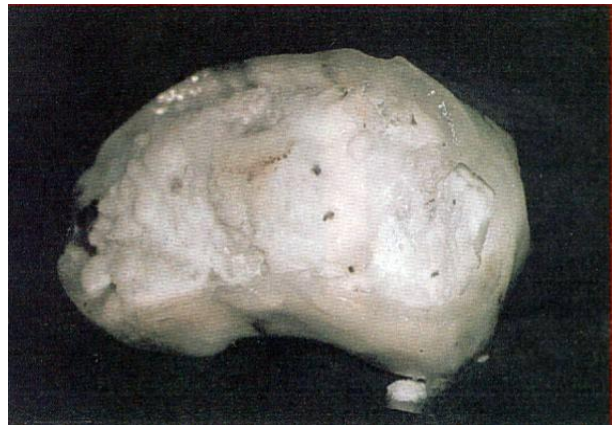
gas. No es tóxico, y además va al suelo al ser más pesado que el aire. Sin

embargo podría ser peligroso por desplazamiento del oxígeno del aire. Por esa razón el local debería tener buena ventilación.

El hielo seco normalmente lo venden en sacos, en cuyo interior hay bloques más o menos grandes, así que deberemos comenzar triturándolo hasta reducirlo a polvo. Lo mejor es envolverlo en una toalla de tela y golpearlo repetidas veces contra el suelo, como hacen los camareros para conseguir hielo picado. Después, si queda algún trozo, se puede cubrir con la toalla y golpear con un martillo. Es recomendable 1'5 ó 2 kg de hielo seco por cada modelo de cometa que se haga.

Se pone esa nieve carbónica sobre un plástico grande. Se mezcla con unos 300 g de tierra oscura y se espolvorea un poco de almidón (dos puntas de espátula), y unas gotas de amoniaco. A continuación se envuelve totalmente con el plástico y el "hatillo" formado se aprieta con fuerza formando una bola más o menos esférica. Se retira el plástico, y se pone la bola en una cubeta de plástico. Hay que manejarla con cuidado para que no se parta en trozos.

Se vierte agua lentamente sobre lo que va a ser el núcleo del cometa. Se formará bastante CO_2 gas, de color blanco, que al ser más pesado que el aire va hacia el suelo. Cuando se haya formado una costra de hielo de agua, ya tenemos nuestro núcleo de cometa, y sólo nos resta observarlo.



Como en los cometas reales, abundantes chorros de gas de CO_2 y agua saldrán del interior por algunos poros. Eso es lo que ocurre en los núcleos de los cometas al acercarse al Sol: se forman erupciones que a veces hacen rotar al cometa, lo desvían de su trayectoria e incluso, si son muy fuertes, pueden llegar a romperlo en trozos. En los cometas reales, una vez pasado el perihelio del cometa (mayor cercanía al Sol), se aleja del astro rey y se vuelve a sumergir en las frías temperaturas que reinan en el espacio. Todo el material del cometa se vuelve a congelar, a la espera de que las leyes de Newton le vuelvan a acercar al Sol. El gas y polvo que se ha desprendido del interior del núcleo en todo el proceso, poco a poco lo va desgastando, y es fácil comprender la limitada vida de un cometa, que sólo le permite repetir esos viajes un cierto número de veces.

Como se ve, la realización de este modelo es sencilla. La única dificultad con la que me he encontrado es la obtención del hielo seco. Se puede conseguir en distribuidores de gases especiales o medicinales (oxígeno, nitrógeno, etc). Por ejemplo la casa Praxair (antiguas Argón y Liquid) distribuye en todas las provincias españolas. Sus teléfonos de Madrid y Barcelona son el 917859710 y el 933361361 respectivamente.

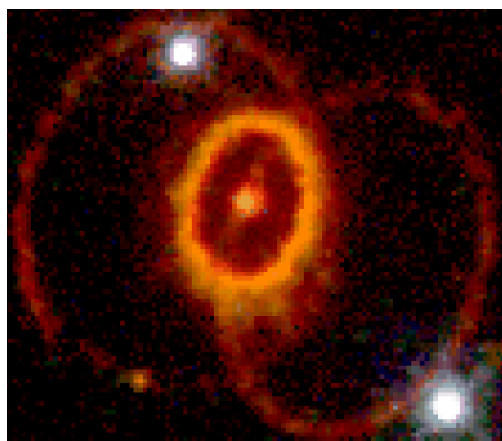
UNA EXPLOSIÓN DE SUPERNOVA EN CLASE

CÓMO EXPLOTA UNA SUPERNOVA

Las estrellas se forman a partir de una nebulosa original, compuesta fundamentalmente de hidrógeno. Esta nebulosa se concentra gravitacionalmente y provoca el aumento de su temperatura interior hasta llegar a los varios millones de grados necesarios para que se fusione el hidrógeno, proceso que desprende grandes cantidades de energía. Entonces la estrella empieza a brillar. El desarrollo posterior y la duración depende de la masa de la estrella. Si la nebulosa inicial era muy grande, la estrella acabará explotando como supernova al final de su vida. Repasemos los principales procesos que, según los conocimientos actuales, se producirán en su interior.



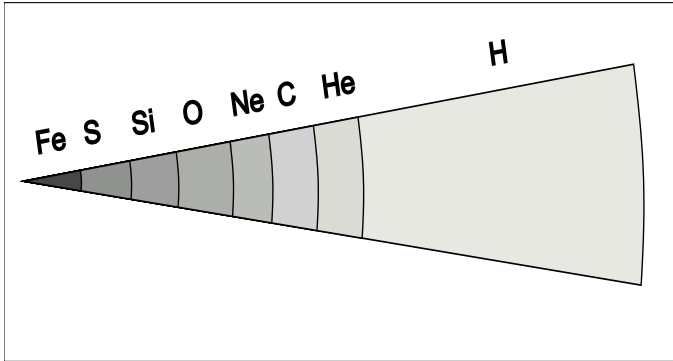
Al principio el hidrógeno se fusiona en el núcleo, y se convierte en helio. La energía que se libera consigue contrarrestar la presión gravitatoria, y la estrella está un tiempo en equilibrio. Cuando se termina el hidrógeno en el interior, aunque en las capas superficiales todavía quede, la propia gravedad hace que se contraiga y que aumente la temperatura del núcleo hasta conseguir los 100 millones de grados necesarios para que se inicie la fusión del helio, que se convierte en carbono. La estrella en ese momento se hincha y se convierte en una supergigante roja.



Al terminarse el helio en su interior, de nuevo se contrae, y llega a iniciarse la combustión del carbono, a 600 millones de grados. De nuevo se hincha consiguiendo tamaños mayores que las supergigantes. El color de estas estrellas es rojo profundo debido a que su temperatura exterior alcanza sólo los 2.000 grados. Se las llama estrellas de carbono, y son todo un espectáculo en el telescopio. Al acabar en la parte central la combustión del carbono, la presión en su interior aumenta, y llega a

arrancar la combustión del neón a 1.000 millones de grados, del oxígeno a 1.500 millones de grados, del silicio a los 2.700 y del azufre a 3.500 millones de grados, que han sido respectivamente los resultados de las fusiones precedentes. Cada una de estas fusiones se hace en un periodo menor de tiempo. El producto final es el hierro, cuya fusión no es posible porque en lugar

de expulsar energía tendría que absorberla. Las diferentes igniciones se han producido siempre en el centro, cuando todavía quedaba material en la periferia, por lo que la estrella ha ido adoptando una estructura en capas, llamada *estructura de cebolla*, con elementos más pesados según vamos profundizando.

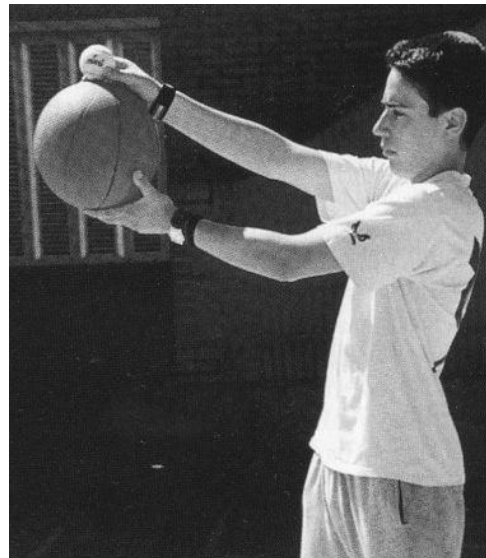


Cuando sólo hay hierro en el centro, la masa de la estrella es tan grande que se produce un inevitable colapso gravitatorio sobre sí misma, pero esta vez sin posibilidad de encender ya nada. En esa caída los núcleos atómicos y los electrones se van juntando cada vez más, hasta formar

en el interior una estrella de neutrones. En ese momento, toda la parte central de la estrella consiste en neutrones en contacto unos con otros, con una densidad tal que una cucharadita pesaría tanto como todos los edificios de una gran ciudad juntos. Y como los neutrones están en contacto unos con otros, la materia no puede contraerse más y la caída a velocidades del orden de la cuarta parte de la velocidad de la luz se detiene de golpe, produciendo un rebote hacia atrás en forma de onda de choque que es el proceso más energético que se conoce en el Universo: una sola estrella en explosión puede brillar más que una galaxia entera, compuesta por miles de millones de estrellas.

MODELO DE LA EXPLOSIÓN

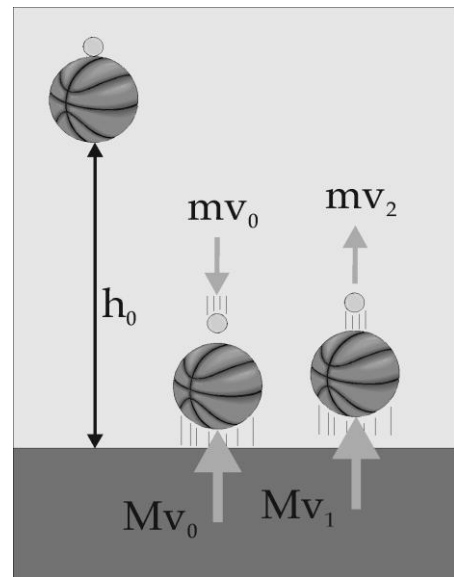
Y aquí es donde viene el modelo que puede servir para hacerse una idea de la energía liberada. El rebote de los átomos pesados contra esa maciza estrella de neutrones, y el de éstos contra los más ligeros que vienen detrás cayendo desde las capas superficiales de esa gigantesca cebolla, se puede representar fácil y espectacularmente con un balón de baloncesto y una pelota de tenis, dejándolos caer juntos sobre un terreno duro. En este modelo, el suelo representa el núcleo macizo de la estrella de neutrones, el balón de baloncesto sería un átomo pesado que rebota, y a su vez empuja al átomo ligero que viene detrás de él, representado por la bola de tenis.



Para realizar el modelo, se sitúa el balón de baloncesto a la altura de nuestros ojos, sobre ella la bola de tenis, lo más vertical posible y se dejan caer las dos a la vez. Si previamente se le pregunta a alguien la altura a la que cree que

llegarán después del rebote, probablemente nos diga que a la inicial, o incluso un poco menos. Sin embargo el resultado es muy diferente.

Al soltarlas, llegan casi al mismo tiempo al suelo. El balón grande rebota elásticamente, y retrocede prácticamente con la misma velocidad que ha llegado. En ese momento choca con la pequeña pelota de tenis, que baja con la misma velocidad con la que el balón sube y la pequeña sale despedida a gran velocidad hacia arriba, y llega mucho más alto. Si estos choques se repitiesen con más bolas, cada vez más ligeras, que cayesen en la misma dirección, las velocidades que se conseguirían serían fantásticas.



No es difícil calcular teóricamente la velocidad y la altura a la que debería subir la bola de tenis, si suponemos que los choques son perfectamente elásticos. En ese caso se debe conservar la cantidad de movimiento y la energía cinética antes y después del choque entre las dos pelotas. Si cogemos como sentido positivo de las velocidades el ascendente, las dos ecuaciones que rigen el choque entre el balón de baloncesto (que ya sube) y la pelota de tenis (que ya baja) son:

$$Mv_0 - mv_0 = Mv_1 + mv_2$$

$$\frac{1}{2}Mv_0^2 + \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}Mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

en las que

M = masa del balón de baloncesto

m = masa de la bola de tenis

v_0 = velocidad de llegada de las dos pelotas al suelo, y a la que rebota hacia arriba la de baloncesto

v_1 = velocidad a la que sale la pelota de baloncesto después de chocar con la de tenis

v_2 = velocidad a la que sale la pelota de tenis después de chocar con la de baloncesto

Despejando v_1 en la primera ecuación y sustituyendo en la segunda, podemos calcular la velocidad v_2 en función de v_0 . Para simplificar las expresiones que salen, se puede considerar que M es mucho mayor que m (una pelota de tenis pesa unos 60 gramos, mientras que la de baloncesto pesa diez veces más). En ese caso es fácil concluir que

$$v_2 = 2v_0$$

y como para las dos velocidades se cumple que

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g}; h_2 = \frac{(2v_0)^2}{2g} \Rightarrow h_2 = 4h_0$$

teóricamente la bola de tenis debería llegar a una altura cuatro veces la inicial. En la práctica es algo menor, pero sí llega a sobrepasar el doble de la altura a la que se dejan caer las pelotas. De hecho si se hace en una habitación, hay que tener cuidado para que no dé en la lámpara del techo o en algún otro objeto delicado.

Este experimento se puede hacer en clase o en otro lugar cerrado, aunque es preferible hacerlo al aire libre. Se podría hacer desde una ventana alta, pero no lo aconsejo: la bola de tenis es muy difícil que caiga perfectamente vertical, por lo que saldrá despedida con gran fuerza en una dirección imprevisible, con posibles consecuencias de las que no quisiera sentirme responsable. En cualquier caso, es un modelo que deja claro cómo el rebote de una supernova provoca una fuerza hacia atrás realmente grande.

En algunas jugueterías o tiendas de Museos de la Ciencia he visto un juguete llamado "Astro Blaster", basado en los mismos principios. Se compone de cuatro pequeñas bolas de goma, de distinto tamaño, unidas por un eje, la última de las cuales sale disparada al rebotar en el suelo. Se puede encontrar en <http://www.exploreco.es>.



MODELO DE AGUJERO NEGRO

Esta experiencia puede servir si se estudia el Universo, ya que entonces seguro que no faltarán preguntas sobre los agujeros negros, objetos muy atractivos para la gente joven. La experiencia también puede servir en temas de Física en los que se vea algo de la Teoría de la Relatividad General.

Se trata de construir un modelo físico de la curvatura del espacio alrededor de una masa. El material necesario es un trozo de malla muy elástica. Después de buscar múltiples candidatos, encontré la que creo que es mejor con gran



diferencia: la que se usa para fijación de apósitos, y que se vende en las farmacias (p.ej. marca *Tubifix*). Las hay de diversos tamaños, pero nos interesa la mayor posible.

Además necesitaremos una esfera metálica o cualquier otro cuerpo pesado, y una canica ligera.

Se corta unos 40 cm de la malla elástica. Si es tubular, se corta además a lo largo de un lado, para hacerla plana. Entre varios alumnos se estira la malla horizontalmente hasta que quede bastante tensa. Así representa el espacio en dos dimensiones.

Se hace rodar por encima una canica ligera: su trayectoria es rectilínea, como la de un rayo de luz al viajar por el espacio. Se deposita a continuación la esfera metálica u otro objeto pesado, y la malla tensa se deforma. Si se hace rodar rápido la misma canica de antes cerca de la masa, su trayectoria se dobla por la deformación de la malla, como lo hace la luz al pasar cerca de un objeto masivo, que deforma el espacio a su alrededor.

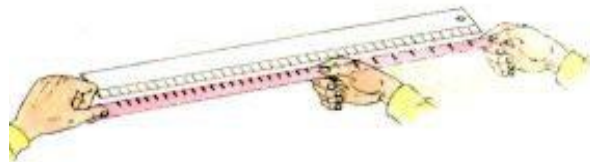
Si esa masa se concentrase mucho, la curvatura de la malla aumentaría y se podría producir una especie de “pozo gravitacional”, del cual no sería capaz de salir una canica que entrara en él. Es lo que ocurre con los agujeros negros: su gravedad deforma tanto el espacio que la luz o cualquier otro objeto no puede salir de él.

EL UNIVERSO EN UNA GOMA ELÁSTICA

Se trata de hacer un modelo de la expansión del Universo. Necesitaremos una goma elástica de unos 20 cm, una regla, un rotulador y unas tijeras.

Con el rotulador, se hacen unas marcas sobre la goma a distancias constantes de 1 cm. Cada una representará una galaxia. Seleccionamos una que representará a la nuestra (no necesariamente tiene que ser la primera marca).

Situamos la goma cerca de la regla, y hacemos que nuestra galaxia coincida con la marca de 3 cm. Las otras galaxias coincidirán con las marcas 1, 2, 4, 5...cm.



Estiramos la goma de tal forma que nuestra galaxia se mantenga en la marca de 3 cm, y que la siguiente se sitúe sobre la de 5 cm. La distancia entre esta galaxia y la nuestra ha pasado de ser 1 cm a 2 cm: se ha duplicado. ¿Qué ha pasado con la distancia entre las demás galaxias y la nuestra? Todas se han duplicado: la que estaba a 2 cm ha pasado a distar 4 cm, la que estaba a 3 cm ha pasado a estar a 6 cm, etc. Y esto ocurre tanto en las galaxias de la izquierda como en las de la derecha.

Si suponemos que el tiempo que ha durado el estiramiento de la goma ha sido 1 s, las velocidades de alejamiento de las galaxias respecto de la nuestra no son iguales: la velocidad de la primera ha sido de 1 cm/s, la de la siguiente ha sido de 2 cm/s, la otra de 3 cm/s, etc.

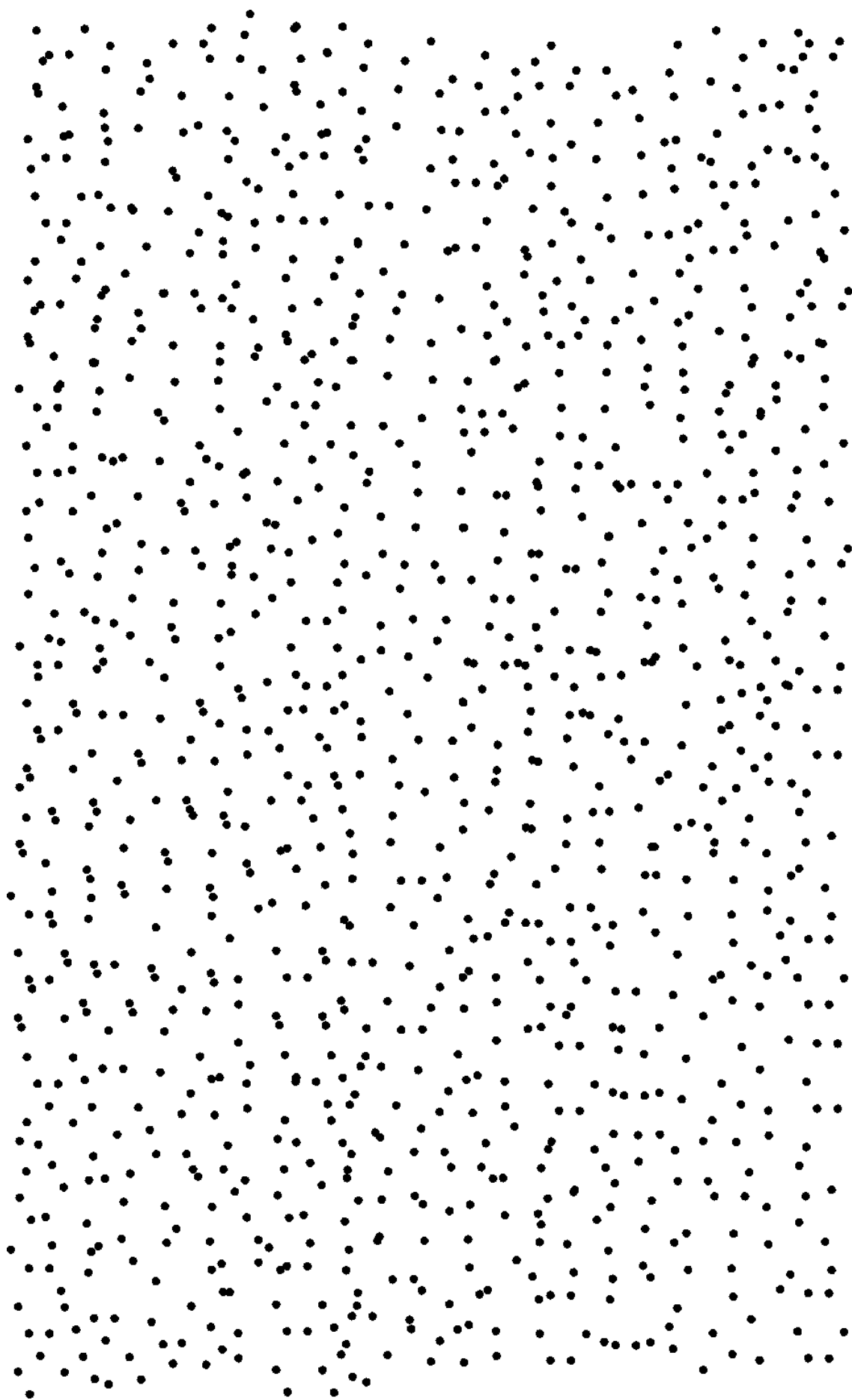
Podemos dibujar las velocidades de alejamiento de cada galaxia respecto de la nuestra en un gráfico frente a las distancias originales a la que estaban. Están en una recta, y sería un modelo de la **Ley de Hubble**.

Por otra parte, un habitante de cualquier "galaxia" vecina vería a la nuestra y a las demás galaxias que se alejan de la suya, exactamente como nos pasa a nosotros. Por tanto, para ver que todas las galaxias se alejan de la nuestra no es necesario que estemos en el centro del Universo.

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Una forma de visualizar la expansión del Universo es superponiendo dos transparencias: una con una distribución aleatoria de puntos, y la segunda es ella misma ampliada ligeramente. Se adjunta un modelo, similar al que viene en un libro de Vincent Icke, Munich, 1994, del cual lamentablemente no he encontrado el título. Se supone que representa a una distribución de galaxias en dos dimensiones. Si se fotocopia sin ampliación (100%) en una transparencia y luego se vuelve a fotocopiar en otra transparencia pero con una ampliación del 105%, y se superponen, se ve perfectamente una representación gráfica de la expansión del Universo.

Se sugiere hacer coincidir uno cualquiera de los puntos en las dos transparencias, y luego hacer coincidir otros distintos, para apreciar que la visión de la expansión en todas las direcciones es común a cualquier punto, y no implica estar en el centro del Universo.



BIBLIOGRAFIA

- Revista *Sky&Telescope* nº 111, noviembre 1995, pág. 90. (Massachusset, USA).
- *Taller de Astronomía*, Antonio Moreno y Ricardo Moreno. Akal ediciones (Madrid, 1996).
- Revista *Universo* nº 45, enero 1999, pág. 40. (Barcelona, España).
- *Project STAR: The Universe in your hands*. Harold P. Coyle y otros. Kendall/Hunt Publishing Company (Dubuque, Iowa, 1993).
- *The Universe at your fingertips. Project ASTRO*. Andrew Fraknoi y otros. Astronomical Society of the Pacific (San Francisco, California, 1997).
- *Historia Breve del Universo*. Ricardo Moreno. Editorial Rialp. Madrid 1998.
- *Craters!*. William K. Hartmann. NSTA. (Arlington, VA, 1995)
- *Experimentos en Astronomía*. Lars Broman, Robert Estalella y Rosa M^a Ros. Editorial Alhambra Longman S.A. (Madrid, 1993).
- Vincent Icke, Munich, 1994.
- <http://education.jpl.nasa.gov/educators/lp5-12.html>
- <http://www.starlab.com/pspl.html>



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 colección.

Más información en www.apea.es

