Taller de Ciencia para Jóvenes 2001 – Práctica de Astronomía:
"La Expansión del Universo y la Ley de Hubble"

Introducción. Este paquete y otros similares forman parte de las prácticas del programa CLEA (Contemporary Laboratory Experiences in Astrophysics), que se puede encontrar en *http://www.gettysburg.edu/academics/physics/clea/CLEAhome.htm.*

Para utilizar este paquete en particular, es necesario estar familiarizado con los siguientes conceptos: **longitud de onda, efecto Doppler, espectroscopía, magnitud, galaxias.**

En la Página de CLEA hay un manual de uso detallado en inglés. Acá damos las instrucciones mínimas para el paquete instalado en una PC con Windows95.

A. En la primera parte del ejercicio, se hace una simulación como si estuviera uno observando galaxias con un telescopio, para hacerles espectroscopía y determinar su corrimiento al rojo.

1. El programa se inicia dando **Inicio... Programas... CLEA Exercises... Hubble Redshift...**
Con ésto aparece la pantalla de CLEA

2. En la pantalla de CLEA se da **File... Login** . Se ponen los nombres de los participantes y un número para la "mesa" de laboratorio.
Con ésto aparece la pantalla de la práctica "La Expansión del Universo y la Ley de Hubble"

3. En esta pantalla se da **File... Run...**, y ésto abre una nueva pantalla que se supone simula al telescopio. Lo primero es abrir el domo ("Dome") que originalmente está cerrado ("Closed"). Cuando se abre el domo vemos una pantalla que simula lo que se ve en un detector moderno. Vemos fuentes redondas y compactas, que se supone son estrellas de nuestra propia Galaxia, así como fuentes difusas y de formas no redondas que son las galaxias externas a la nuestra, mucho más lejanas que las estrellas de nuestra Galaxia.

4. Si no hacemos nada, veremos que por la rotación de la Tierra, las fuentes del cielo se mueven en la pantalla y se van saliendo del campo. Para que el telescopio siga el movimiento de los astros se activa **Tracking** , o sea el Guiado del telescopio que hace que éste se mueva para compensar la rotación de la Tierra. Al activar **Tracking**, este pasa de **Off** a **On**.

5. En la pantalla veremos un cuadro rojo que es el campo del buscador ("Finder"). Este es un campo relativamente grande. Con la ayuda de los controles que mueven el telescopio hacia el norte, sur, este u oeste, centramos a una de las galaxias que aparecen en el campo. Para moverse mas rápido, uno puede cambiar el **Slew Rate**, o Velocidad de Barrido a números mayores.

6. Ya que estemos mas o menos centrados sobre la galaxia, activamos **Change View**, de modo que pasemos del campo del buscador (”Finder”) al campo del instrumento (Instrument), que es mas pequeño. Al hacer ésto se ve la galaxia mas grande y aparece un rectángulo rojo, que es la llamada “rendija” del espectrómetro. Centramos la rendija en la parte mas brillante de la galaxia (para captar el mayor número de fotones). Ahora damos **Take Reading** (Iniciar Lectura) y aparece una nueva pantalla, donde damos **Start/Resume Count** (Iniciar/Reanudar Conteo). El instrumento comienza a captar fotones de la galaxia y vemos como poco a poco se va formando un “espectro”. Este espectro estará formado por un “continuo”, en el cual aparecen tres líneas en absorción. Estas tres líneas son, de izquierda a derecha, la línea K del calcio, la línea H del calcio, y la banda G de la molécula de CH. Sólo nos vamos a fijar en la primera de ellas: la línea K del calcio. Este espectro que estamos viendo proviene de la luz integrada de todas las estrellas de la galaxia que estamos observando. Ya que se vean claramente las líneas en absorción, le paramos a la integración dando **Stop Count**. Colocándonos sobre la pantalla con el ”mouse” y apretando el botón del lado izquierdo del ”mouse” aparece una raya roja vertical que podemos mover con el ”mouse” hasta centrarla en la línea K. En la parte de arriba de la pantalla aparece la longitud de onda (”Wavelength”) donde hemos centrado y en Tabla que sigue, metemos este dato en la cuarta columna de la primera línea. La longitud de onda aparece en las unidades conocidas como Angstroms (Å), donde 1 Å= 10^{-8} cm. Si la galaxia estuviera en reposo (o sea, ni alejándose ni acercándose a nosotros), la longitud de onda debería ser de 3933.67 Å. Como veremos, la longitud de onda *medida* sale siempre mas grande, como dicen los astrónomos, *corrida al rojo*. Esto es así porque las galaxias se alejan entre sí.

DATOS DE LAS GALAXIAS OBSERVADAS

Nombre de la Galaxia	Magnitud Aparente	Distancia (Mpc)	λ de la Línea K del Ca (Å)	Velocidad (km s^{-1})

7. En esa misma pantalla aparece el nombre del objeto (”Object”) y la magnitud aparente de la galaxia (”Apparent Magnitude”) y metemos estos dos datos de la galaxia en las columnas 1 y 2 de la primera línea de la Tabla.

8. Ahora damos **Return** y luego **Aceptar** para regresar a la pantalla que simula al telescopio. Ahí damos **Change View** para regresar a **Finder**. Luego activamos

Field. Al abrir ésto, veremos que la galaxia que medimos está en el campo de "Coma Berenices". Repetimos los pasos del 5 al 7 para *una galaxia* de cada uno de los otros otro campos (el último campo, "Sagittarius", es una broma), hasta llenar las columnas 1, 2, y 4 de la Tabla. En algunas de las galaxias, la línea K aparecerá casi en la orilla derecha del espectro. Fíjense que entre más débil y pequeña se ve la galaxia (o sea, mientras más lejana) más "corridas" aparecen las líneas.

Como una última cosa, podemos sacar un espectro de una de las estrellas que se ven en los campos. La línea K del calcio aparecerá muy cerca de su longitud de onda en reposo, indicando que la estrella no tiene gran velocidad respecto a nosotros.

Al terminar, cerramos el programa.

B. Cálculo de la Distancia y de la Velocidad de Recesión de las Galaxias.

Con los datos que hemos recabado en la simulación podemos encontrar la distancia y velocidad de recesión de las cinco galaxias y derivar la famosa ley de Hubble.

Determinemos primero la distancia a las galaxias. Los astrónomos que trabajan en en la parte visible del espectro electromagnético miden el brillo de los cuerpos celestes usando magnitudes, una medida que viene de los griegos. Mientras mas grande la magnitud aparente, m, más débil el objeto. Por otra parte, la magnitud absoluta, M, es la magnitud aparente de un cuerpo cuando está colocado a una distancia de 10 parsecs (1 pc $= 3.1 \times 10^{18}$ cm). Entonces, se puede demostrar (ésto lo verán en las clases) que la distancia D a un cuerpo luminoso, dada en pc, es:

$$logD = \frac{m - M + 5}{5}.$$

Tenemos las magnitudes aparentes de las galaxias y haremos la suposición de que todas las galaxias tienen $M = -22$. Esta suposición no es correcta, pero bastará para el ejercicio. Las distancias nos saldrán en pc, pero en la Tabla las queremos poner en Mpc (millones de pc), de modo que las dividimos entre 10^6 y las ponemos en la Tabla.

Finalmente, para calcular la velocidad, usamos la ecuación del efecto Doppler que nos dice que la velocidad en km s^{-1} de un cuerpo está dada por

$$V = c \; \frac{\lambda(observada) - \lambda(reposo)}{\lambda(reposo)},$$

donde c es la velocidad de la luz, 300,000 km s^{-1}, $\lambda(observada)$ es la que medimos y pusimos en la Tabla, y $\lambda(reposo) = 3933.67$ Å.

C. Graficado de los datos, determinación de la ley de Hubble, y determinación de la edad del Universo.

Ya con estos datos, podemos hacer una gráfica colocándolos de manera aproximada en la figura que se adjunta. Esta figura confirma la ley de Hubble, que nos dice que la velocidad de recesión, V, de una galaxia es proporcional a su distancia, D, o sea

$$V = HD,$$

donde H es la constante de Hubble. Hubble fué el primero en percatarse de que el Universo se está expandiendo (puesto que las galaxias se alejan entre sí).

Estime el valor de la constante de Hubble, en km s^{-1} Mpc^{-1}, a partir de la gráfica. Escriba abajo su estimado (use sólo dos cifras significativas).

Sugerencia: H es la pendiente de la recta que pasa lo mas cerca de los puntos.

$$H = \qquad\qquad km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}.$$

H es una de las constantes fundamentales de la ciencia (en realidad no es necesariamente una constante en el tiempo, pero ésta es otra historia). Sabemos que por la expansión del Universo cada vez las galaxias están más separadas entre sí. Por lo tanto, si imaginariamente echamos a andar el tiempo en reversa, llegaremos a un momento en el pasado en el que todo el Universo estaba comprimido en una región muy pequeña. Si suponemos que la expansión del Universo ha sido constante, ¿cuánto hace que se inició el Universo? ¿cómo está relacionada esta edad con la constante de Hubble?

Sugerencia: Si dos galaxias están hoy separadas por una distancia D y se separan a velocidad constante V, ¿cuánto hace que estaban las dos en el mismo punto?

A este momento de origen se le conoce como la Gran Explosión.

D. Preguntas y Comentarios Adicionales

La velocidad la calculamos usando

$$V = c\ \frac{\lambda(observada) - \lambda(reposo)}{\lambda(reposo)}. \tag{1}$$

Al cociente

$$\frac{\lambda(observada) - \lambda(reposo)}{\lambda(reposo)},$$

los astrónomos le llaman la z o corrimiento al rojo de la galaxia estudiada.

¿Cuál fué la mayor z medida en el ejercicio?

¿Cuál es la mayor z que se ha medido para un cuasar (hasta el año 2001)?

¿Cuál es la mayor z que se ha medido para cualquier fenómeno astronómico?

Si uno usa la ecuación (1) para la velocidad para un objeto con z mayor que uno, nos saldría que su velocidad es mayor que la de la luz, lo cual es imposible. Lo que pasa es que, en general, uno debe de usar la ecuación Doppler *relativista:*

$$V = c\ \frac{\lambda(observada)^2 - \lambda(reposo)^2}{\lambda(observada)^2 + \lambda(reposo)^2}. \tag{2}$$

Demuestre que cuando $\lambda(observada) \simeq \lambda(reposo)$, la ecuación relativista (2) se reduce a la ecuación (1).

Luis F. Rodríguez