

Proyecto Les de Hubble

• INTRODUCCIÓN

¿Es el Universo un lugar estable o es dinámico? Esta es la pregunta que se han hecho muchos astrónomos durante miles de años.

Albert Einstein, en 1915, descubrió teóricamente que el universo debía ser un lugar dinámico, o contrayéndose o expandiéndose, ¡Pero ni él mismo creyó en sus propios resultados!

¿Cómo hacerlo si hasta ese entonces todo apuntaba a que el universo era un lugar estable?



La idea de un universo en contracción o expansión no hace mucho sentido a lo que sabemos, ya que... ¡Esto significaría que todos los objetos, incluidos nosotros mismos, nos estamos separando unos de otros "simplemente" porque el universo es así!.

Claramente, esto no es visible en nuestra escala de distancias, pero, ¿podemos observarlo en objetos gigantes y lejanos como las galaxias?

Exactamente aquello fue lo que realizó el astrónomo Edwin Hubble. Hoy, tú seguirás sus pasos y podrás responder todas las dudas expuestas, ¿Está el Universo en expansión/contracción o es un lugar estacionario? ¿Podremos observar éste fenómeno?

• ¿POR DÓNDE EMPEZAR?: EL DIAGRAMA DE HUBBLE

Edwin Hubble ideó un famoso diagrama que ha sido bautizado en su nombre: El Diagrama de Hubble. En este se relaciona la velocidad a la que se alejan las galaxias de nosotros con la distancia que ellas tienen a nosotros. Esto nos hace pensar en formas de poder medir la velocidad y la distancia de las galaxias, ¿Cómo podríamos hacerlo si toda la información que obtenemos de las galaxias es su luz?

• OBTENCIÓN DE DISTANCIAS

El primer paso para poder obtener un Diagrama de Hubble es medir distancias. Medir distancias en astronomía es extremadamente difícil, pero, afortunadamente para nosotros, ¡Solo necesitamos distancias relativas a las galaxias de interés para crear un Diagrama de Hubble!

Obtener distancias relativas es un caso totalmente análogo al de mirar dos edificios desde un mirador:

Uno puede decir que "cierto edificio" es "el doble de grande" que otro. La idea aquí es hacer exactamente lo mismo con las galaxias: Tomar alguna galaxia como referencia y comparar a las demás en relación a esa. Es por ésta relación que se llaman distancias relativas.

¡PREPÁRATE PARA HACER UNO DE LOS MAYORES DESCUBRIMIENTOS DEL SIGLO XXI!

La manera más fácil de comparar galaxias es comparando sus magnitudes: Una medida del brillo de éstas. Recordemos que en magnitudes los números mas grandes corresponden a objetos menos brillantes (así, usualmente los objetos mas brillantes del cielo presentan magnitudes negativas, como por ejemplo el Sol, que tiene una magnitud de -26).

EJERCICIO 1

El objetivo de este ejercicio es encontrar las magnitudes de seis galaxias en la base de datos del SDSS. La tabla siguiente muestra los números de identificación (ID's) y las posiciones (RA y DEC) de seis galaxias:

ID	Ascensión Recta (RA)	Declinación (DEC)
587731186738331786	354.35	0.39167
588015509267153049	354.98998	0.13519
587722983367901477	219.31858	0.17731
587725575888961795	260.80622	58.58956
587725589849506099	263.94885	54.36385
587728948510720283	150.09651	-0.27059

Para observar la información de una galaxia haz clic en la columna "ID". Puedes guardar la información de la galaxia, una vez que la estés observando en tu navegador web, en el menú de la izquierda bajo "Notes", haciendo clic en la opción "Save in Notes" (si no sabes como funcionan estas opciones, revisa el siguiente tutorial haciendo [clic aquí](#)).

Puedes ver ésta información en el mismo menú de la izquierda, bajo "Notes" haciendo clic en la opción "Show Notes". Luego, descarga los datos a tu computador.

A la derecha de la imagen de la galaxia en la OET podrás observar cinco sets de datos: u, g, r, i y z.

Esas son las magnitudes de la galaxia en las cinco longitudes de onda que mide el SDSS. Puedes guardar la información de la galaxia, una vez que la estés observando en tu navegador web, en el menú de la izquierda bajo "Notes", haciendo clic en la opción "Save in Notes".

Esto guardará automáticamente toda la información relevante de la galaxia que estas observando. Puedes repetir esto con todas las galaxias, hasta que hayas recopilado la información de todas ellas.

Si asumimos que, en promedio, todas las galaxias emiten vagamente la misma cantidad de luz, entonces la diferencia en magnitudes entre ellas es debida únicamente a la distancia que las separa (análogamente, en una calle iluminada por focos de luz, podemos identificar qué focos están más lejos solo observando la luz que emiten: Sabemos que la luz del foco mas distante es la más débil).

Mas adelante podremos transformar las magnitudes a distancias relativas, pero por ahora, usaremos las magnitudes como substitutos de las distancias relativas para crear un Diagrama de Hubble.

EJERCICIO 2

Explica por qué las magnitudes pueden ser usadas como un substituto para las distancias relativas en el Diagrama de Hubble.



• CORRIENTES AL ROJO ("REDSHIFTS")

¿Has notado como el sonido de las sirenas de una ambulancia, cuando éstas se acercan hacia ti, suenan mas agudas, mientras que éstas suenan mas graves al alejarse?

Este efecto es conocido como el "Efecto Doppler". El mismo efecto también se aplica a la luz, es decir, si un objeto que emite un rayo de luz se acerca a ti ésta se observará "mas aguda", mientras que si el objeto que emite luz hacia a ti se aleja, la luz se observará "mas grave". El grado de "agudeza" o de "gravedad" de la luz o del sonido es medido numéricamente con la longitud de onda.

Nuestro ojo detecta la agudeza de la luz en ésta misma forma, solo que en vez de números le asigna colores, siendo la luz roja la más "grave" (la de mayor longitud de onda) y la luz azul la más "aguda" (la de menor longitud de onda). Bajo ésta analogía, el término "medio" sería la luz verde (esto quiere decir, una longitud de onda media, entre la azul y la roja).

Un experimento que todos podemos observar es como se encandilan nuestros ojos en la noche: Si la luz, moderada, que observamos en la obscuridad es roja, no nos encandilaremos; por otro lado, si observamos luz azul, ¡Nos encandilaremos fácilmente! Esto es análogo al caso de escuchar una voz muy grave a una voz muy aguda, ¡Una voz aguda se tolera mucho menos que una voz grave!

De acuerdo con lo anterior, el Efecto Doppler estipula que cuando un objeto se acerca hacia nosotros, el color de éste se observa "más agudo", es decir, se torna más azul.

Decimos entonces que el color "está corrido hacia el azul". Por el contrario, cuando el objeto se aleja de nosotros, lo observamos mas "grave" de lo que es, pues se torna más rojo.

Decimos entonces que el color "está corrido hacia el rojo". Éste efecto no es observable en automóviles, por ejemplo, ya que las velocidades son muy pequeñas como para comparar el efecto de ver más azul de lo que es a un auto que se dirige hacia nosotros, pero en objetos veloces si que podemos observar éste efecto, aunque no con nuestros ojos, si con ciertos instrumentos astronómicos: En las galaxias

Cuando observamos la luz de galaxias, lo que se estudia es su espectro electromagnético. En el espectro de las galaxias y estrellas, se pueden observar usualmente pequeños "saltos", también llamadas "líneas". Estas líneas aparecen cuando cierto átomo o molécula se interpone entre la luz que nos llega.

Esto también se puede hacer en la Tierra, por lo que sabemos exactamente en cuales longitudes de onda debería manifestarse éste fenómeno y con que átomos y/o moléculas, ¡Así podemos saber también que átomos y moléculas contiene la galaxia/estrella a estudiar!

EL EFECTO ANTERIORMENTE MENCIONADO TAMBIÉN SIRVE PARA MEDIR EL EFECTO DOPPLER.

Si sabemos que cierta línea debería aparecer en una cierta longitud de onda, pero al observar el espectro de la galaxia aparece "corrida hacia el rojo" (es decir, la línea aparece, pero en una longitud de onda mas grande que la esperada), ¡Entonces podemos decir que la galaxia se está alejando de nosotros!

De la misma forma, si la línea aparece "corrida hacia el azul" (es decir, la línea aparece, pero en una longitud de onda mas pequeña que la esperada), ¡Entonces podemos decir que la galaxia se está acercando a nosotros!



EJERCICIO 3 Un átomo de Hidrógeno en una galaxia lejana se interpone entre la luz que medimos de ella y nosotros. Sabemos que éste átomo debiera producir una línea a los 6562.2 \AA , pero en la Tierra observamos que la línea se produce a los 6562.3 \AA . De acuerdo con ésto:

¿Se está alejando o acercando la galaxia de nosotros?

Midiendo las diferencias entre las longitudes de onda, los astrónomos pueden calcular cuan "corrida hacia el rojo o hacia el azul" está una galaxia, a través de una unidad de medida llamado el "Redshift" de la galaxia, que usualmente se denota por la letra z . Si el valor de z es positivo, entonces la galaxia se aleja de nosotros, mientras que si el valor es negativo, la galaxia se acerca hacia nosotros.

EJERCICIO 4 Encuentra los redshifts para las galaxias que usaste en el Ejercicio 1. Si guardaste los datos como se explica en el Ejercicio 1, podrás volver a ellos haciendo click en "Show Notes".

Si haces clic en "Explore" en cada una de las galaxias, verás los datos completos nuevamente de la galaxia. Si bajas en la pantalla, podrás observar el espectro de la galaxia en cuestión.

Haz clic en él, y justamente en la parte inferior del gráfico estará el número "z": Éste es el valor del Redshift. Guarda los datos en la misma planilla que usaste en el Ejercicio 1.

• HACIENDO EL DIAGRAMA

Ahora que tenemos las magnitudes y redshifts de las seis galaxias, ¡Estamos listos para crear el Diagrama de Hubble! Usaremos el programa graficador de Microsoft Excel para crear el diagrama. Las instrucciones del siguiente ejercicio te dirán como hacer un gráfico en Excel. Para usar otros programas graficadores, los pasos a seguir deberían ser similares.

EJERCICIO 5 Crearemos un simple Diagrama de Hubble para seis galaxias.

Usando la planilla de los ejercicio anteriores, has un gráfico de magnitud v/s redshift, es decir, el redshift en el eje X y la magnitud en el eje Y. Si no recuerdas como hacerlo, sigue el siguiente tutorial haciendo [clic aquí](#).

El gráfico debería mostrar que a medida que la magnitud aumenta, el redshift aumenta. En otras palabras, el diagrama debería mostrar que galaxias mas débiles tienen mayores redshifts.

Abre la planilla en la que has estado trabajando en un programa graficador como Microsoft Excel. Si no tienes un programa graficador, puedes descargar un programa gratis como Open Office, para el cual debes seguir pasos similares a los que se mencionarán aquí.

Usaremos ahora la planilla que has estado usando para guardar los valores de las magnitudes y los redshifts de cada galaxia. Necesitamos, aún así, separar una magnitud (a tu elección) para hacer el diagrama que buscamos: Un gráfico de Magnitud v/s Redshift.

Para ello, escoge una columna de Magnitudes y copia todos los datos al lado derecho de la columna donde anotaste los Redshifts. Ahora haz clic sobre el primer redshift que se encuentre anotado y, sin soltar el clic, mueve el Mouse hasta la última magnitud que anotaste, hacia abajo.

De esa manera seleccionarás todos los datos que has obtenido. Luego, haz clic en la casilla de gráficos (un botón que se asemeja a un gráfico de barras) para abrir el "Asistente para gráficos". Una vez abierto, selecciona en "Tipo de gráfico" la opción "XY (Dispersión)" y haz clic en "Siguiente".

En la ventana siguiente presiona "Siguiente", nuevamente. Luego llegarás a una ventana en la cual podrás ponerle un título al gráfico y nombres a los ejes. Nombra el eje X como "Redshift" y el eje Y como "Magnitud". Haz clic en "Siguiente" y luego en "Finalizar", ¡De ésta manera podremos observar un gráfico en la planilla!





¿Los datos realmente muestran la relación que esperábamos entre la magnitud y el redshift?

Cuando los científicos tratan de encontrar relaciones en una serie de datos, muchas veces hablan de un "modelo":

En éste caso, buscamos un modelo que relacione la magnitud y el redshift de una manera lineal: Si la magnitud crece, queremos que el redshift también crezca, siempre de la misma manera. El ajuste puede ser descrito por un porcentaje, que muestra cuan cerca están los puntos del lugar donde deberían estar si el modelo fuera cierto.

Como todo experimento tiene algún error y toda observación tiene cierta incerteza estadística, el ajuste nunca es 100% certero. Generalmente, los científicos consideran que un ajuste sobre el 90% muestra que el modelo es consistente con los datos obtenidos. ¿Los datos realmente muestran la relación que esperábamos entre la magnitud y el redshift?



EJERCICIO 6 Encuentra un ajuste lineal en tu Diagrama de Hubble. Microsoft Excel (o cualquier otro programa graficador) puede encontrar automáticamente el ajuste usando una "línea de tendencia".

En Excel, haz clic derecho en cualquiera de los puntos, y selecciona la opción "Agregar línea de tendencia...". Se abrirá una ventana. Haz clic en la solapa "Opciones" y selecciona la casilla "Presentar el valor R cuadrado en el gráfico". Finalmente, haz clic en "Aceptar".

Un nombre con un número deberían aparecer en el área del gráfico. Éste es el valor del "Chi cuadrado".

Haz clic en el y muévelo a un lugar en el gráfico donde lo puedas observar claramente. Multiplica el valor de Chi cuadrado por 100 para encontrar el porcentaje de ajuste.

¿Qué número es? ¿Es una línea recta un buen ajuste a tus datos?

• OTRO DIAGRAMA DE HUBBLE

¡Acabas de construir un Diagrama de Hubble con seis galaxias! Pero... ¿Es esto suficiente? Intentemos hacer el mismo diagrama pero con otras galaxias.

EJERCICIO 7

Repite los ejercicios 4,5 y 6 con las siguientes galaxias.



OBJECT ID	RIGHT ASCENSION	DECLINATION
588848899398041835	230.76984	-0.5166
588848899398959468	232.96006	-0.47602
587731187278151924	1.19287	0.70164
588015508733427877	2.18327	-0.27945
588015509807562923	2.97483	0.53232
588015510343975147	2.02961	0.99069

¿Cómo luce el gráfico ahora? ¿Por qué es diferente?

Cuando queremos demostrar algo con un modelo, debemos tomar cuantas muestras sea posible. Como pudimos observar, no podemos afirmar nada con los datos anteriormente mencionados: ¡Puede que nuestro gráfico sea una mera coincidencia en ambos casos!

Necesitamos encontrar propiedades comunes en las galaxias, puesto que en los ejercicios anteriores asumimos que las galaxias tenían el mismo brillo y que la diferencia en magnitudes solo se debía a su diferencia en distancia,

¿Existirán entonces otras maneras de medir distancias a las galaxias?

¿Puedes pensar en alguna manera de superar esta barrera?

• ESTIMANDO LAS DISTANCIAS A LAS GALAXIAS

¿Recuerdas que antes utilizamos las magnitudes como distancias relativas? ¡Resulta que las magnitudes si las podemos convertir para medir las distancias relativas!. Para hacer esto debemos cambiar la escala de las magnitudes, pero... ¿Por qué?

Sucede que los astrónomos del mundo tienen a veces extrañas formas de medir algunas cosas, entre ellas se encuentra la escala de magnitudes. Ya hemos hablado mucho de las magnitudes pero a esta altura ¿Sabes lo que realmente mide la magnitud?

El valor que la magnitud mide es el flujo radiativo, o sea, la cantidad de luz que llega a cierta área en un tiempo dado. La fórmula que tenemos entonces para encontrar el flujo F de la magnitud m es:

$$F = 2.51^{-m}$$

F es un número relativo que compara el flujo que nos llega en la Tierra a un valor estándar: La estrella Vega en la constelación del norte, de Lyra. Pero como buscamos distancias relativas, podemos usar el flujo radiativo para obtenerlas. Esto suena muy complicado pero en realidad es muy simple.

Lo que debemos hacer primero es tomar la raíz cuadrada del flujo radiativo. Luego toma el inverso de la raíz cuadrada (o sea dividido 1 por la raíz cuadrada del flujo radiativo): El resultado es una distancia relativa a la galaxia. Por ejemplo, supongamos que queremos obtener la distancia relativa de una galaxia de magnitud 14. De acuerdo a la fórmula para el flujo F, usando una calculadora científica obtenemos que:

$$F=2.51^{-14} = 2.53 \times 10^{-6}$$

Cuya raíz cuadrada es 0.00159. Si dividimos 1 por la raíz cuadrada del flujo obtenemos nuestra distancia relativa que en este caso será 628.93.

Como ya habíamos mencionado antes, los números pueden complicarnos un poco la vida, así que para olvidarnos en cierta forma de esto, lo que haremos será comparar las galaxias entre ellas, o sea tal como el ejemplo de los edificios que dimos al principio, diremos que un edificio está a cierta distancia y que otro está al doble o quizás al triple, todo dependerá de lo que hayamos obtenido con el flujo antes.

En resumen, lo que haremos será decir que una galaxia está a una distancia de 1 y que las siguientes están a una distancia de 2, 3, 4, etc dependiendo de los datos, con esto lo que hacemos es obtener medidas relativas a esa galaxia, a este proceso se le llama "normalizar".

Para normalizar las distancias relativas, crea una razón entre las distancias relativas de la galaxia más cercana (d1) y la segunda más cercana (d2) tal que:

$$d1/d2 = 1/x$$

¡Luego simplemente encuentra la x! Que será la distancia normalizada para la segunda galaxia. Haz lo mismo con el resto de las galaxias. Haciendo esto medirás con certeza las verdaderas distancias relativas a las galaxias.



EJERCICIO 8

Encuentra las distancias relativas entre las seis galaxias usando las magnitudes que encontraste en el Ejercicio 1. Usa una calculadora científica para que puedas mostrar los números en notación científica (O sea, 1,5 millones = $1,5 \times 10^6$).

Usa [ésta planilla](#) de cálculo para ayudarte con tus cálculos.



¿SÉ TE OCURREN MANERAS PARA ESTIMAR DISTANCIAS A GALAXIAS AL VER ESTA GRANDIOSA IMÁGEN? LAS GALAXIAS PERTENECEN A LA CONSTELACIÓN PEGASO.



¿QUÉ OTRA FORMA TENEMOS DE ESTIMAR DISTANCIAS A TRAVÉS DE LA GALAXIA?

Otra forma es mirar su tamaño aparente. Mientras más lejos está una galaxia, más pequeña parecerá en el cielo.

Para encontrar distancias relativas usando ésta técnica, mide el tamaño de una galaxia a través de una imagen de ella en cualquier unidad que te parezca:

Pulgadas, minutos de grados o lo que sea. ¿Qué hacemos luego? Imagina que todas las galaxias son del mismo tamaño.

Si decimos que cierta galaxia está a una distancia de 1 y otra se ve en el cielo con la mitad del tamaño de la primera, ¿a qué distancia debiera estar? Así es, al doble de distancia de la primera.

Entonces, si le asocias un número a cada galaxia como indicamos, el inverso del número te dirá la distancia relativa a la galaxia.

EJERCICIO 9 Escribe las dos técnicas para encontrar distancias relativas como ecuaciones. ¿Se te ocurre alguna manera de deducirlas con geometría? O mejor aún, ¿se te ocurre como deducirlas con algún principio físico?

PREGUNTA 1 Supone que las distancias relativas de un número de galaxias usando brillos no coinciden con las distancias relativas usando tamaños aparentes. ¿Qué puedes concluir?



Aunque sepas la distancia relativa correcta a una galaxia, todavía tienes el problema del ejercicio 5. Diferentes galaxias tienen diferentes propiedades. Supón que alguna galaxia es el doble de grande que una galaxia promedio.

Acá en la Tierra lo único que tenemos es su imagen. Cuando vemos una imagen mas grande y no tenemos idea de como es la galaxia ¿qué haríamos? Asumiríamos que está mas cerca de nosotros.

Entonces, como no conocemos la galaxia en realidad, podríamos estarnos equivocando al estimar la distancia real.

Como nos estaríamos equivocando, si usamos esa distancia en un Diagrama de Hubble , no obtendríamos resultados correctos.

Esto si que es un problema, ¿Cómo lo superamos?, dejaremos de mirar solo galaxias individuales, desde ahora veremos cúmulos de galaxias (Los cúmulos son agrupaciones de muchas galaxias)

• ESTIMANDO LA DISTANCIA A CÚMULOS DE GALAXIAS

La llave que usaremos para superar nuestro problema de poca información sobre las propiedades de las galaxias es reconocer que los cúmulos pueden ser usados como unidades estadísticas o poblaciones de galaxias, ¿Qué significa esto?, significa que aunque las propiedades de cada una de las galaxias puede variar considerablemente, en general, el promedio de todas las galaxias en un cúmulo debería ser cercano a una galaxia promedio, considerando todas sus propiedades.

Pero, ¿Podemos hacer eso? ¡Por supuesto! Es lo que hacemos cada día en una encuesta. Si te fijas, en ocasiones se realizan encuestas a un grupo enorme de personas. En estos casos ya no importa la opinión particular de las personas, sino que la suma de las opiniones de todos los encuestados, ¡Ya no importa que dos de ellos sean muy distintos porque habrá dos mil personas más para comparar! Con las galaxias es la misma historia: Podremos considerar cúmulos con docenas o miles de galaxias.

De este modo, al igual que en las encuestas, mientras más grande sea la muestra, mejor será la estadística.

Puede ser que aún tengas dudas, ¿Será posible que estudiando los cúmulos de galaxias el análisis mejore? ¿qué cosa cambiaría respecto de lo que hacíamos antes? Bueno, como las distancias son tan grandes en el espacio, cuando vemos un cúmulo podemos decir que efectivamente las galaxias están a la misma distancia (relativa y absoluta) de nosotros.

Esto quiere decir que los tamaños y brillos aparentes (esos que percibimos) están en las mismas proporciones que los "verdaderos" tamaños y brillos, o sea, si la galaxia A de un cúmulo se ve 3.5 veces más brillante que la galaxia B, en realidad emite 3.5 veces más luz. Claramente estudiando cúmulos mejorará nuestra apreciación del universo.



Fuente: Astronomy Picture of the Day (NASA).
Credit & Copyright: Tony Hallas

"¿CUÁNTA INFORMACIÓN NOS PUEDEN ENTREGAR LOS CÚMULOS DE GALAXIAS?
EN LA IMÁGEN, EL CÚMULO DE GALAXIAS DE HÉRCULES."

Pese a todas las consideraciones que hemos mencionado, el verdadero truco al estimar las distancias a las galaxias es saber qué galaxias son realmente parte del cúmulo. Si vemos dos galaxias en la misma zona del cielo no significa que estén en un mismo cúmulo, podría darse que estén en la misma dirección pero se encuentren a distancias muy distintas, así que aunque ambas se ven muy cercanas puede ser que estén muy lejos.

¿Cómo agrupar las galaxias en sus propios cúmulos? Imaginemos que las galaxias son como edificios, y los grupos y cúmulos son como pueblos y ciudades respectivamente. Imaginemos también que estamos en una plataforma muy alta en una torre desde la que podemos observar ciudades y pueblos muy lejanos y como herramienta tenemos nuestro telescopio. Nuestra misión es investigar lugares donde se encuentran los edificios, pueblos y ciudades y hacer un mapa que muestre sus posiciones con respecto a ti en el centro. No es posible usar más información que la que obtengamos del telescopio.

Incluso en esta escala nos podemos confundir y un edificio de un piso tendrá la misma altura aparente que otro de diez pisos si éste último se encuentra diez veces más lejos. Pero no es común que confundas un pequeño pueblo con una gran ciudad. Con esto, ya hay suficiente información para que puedas ubicar cada edificio en sus posiciones relativas correctas.



PREGUNTA 2

¿Por qué podemos decir que las galaxias en un cúmulo están todas a la misma distancia?



PREGUNTA 3

Cuáles son las pistas e indicaciones que se mencionaron? ¿Podrían aplicarse esas técnicas para estimar distancias relativas a las galaxias en el espacio?

EJERCICIO 10

Mira las imágenes dadas por el SDSS de los siguientes cúmulos.

NOMBRE DEL CÚMULO	RUN	CAMCOL	FIELD
Abell 2255	1356	2	32
Abell 603	756	3	748
Abell 1856	752	3	468
Unnamed	1339	3	11
Unnamed	756	1	728

Clic en un link para ver una foto del cúmulo

Para cada cúmulo, piensa en cómo saber que las galaxias son realmente parte del cúmulo.

¿Qué propiedades son similares entre galaxias de un mismo cúmulo?

¿Qué propiedades muestran un amplio rango ? (No están bien definidas).

¿Cómo podrías argumentar, usando solo las imágenes dadas, si una galaxia pertenece realmente al cúmulo, opuesto a que fuera una galaxia en la misma dirección pero en una distancia distinta?



Una vez que ya sabes qué galaxias son miembros de un cúmulo, puedes comparar las propiedades de las galaxias individuales en diferentes cúmulos. Por ejemplo, el tamaño promedio de una galaxia en un cúmulo debería ser muy parecido al tamaño promedio de cualquier otro cúmulo.

Así mismo podemos hacer la misma comparación con otras propiedades de las galaxias. ¿Se te ocurre alguno? Podríamos decir que la galaxia más brillante en un cúmulo debería tener aproximadamente el mismo brillo real que la galaxia mas brillante en otro cúmulo.

Dentro de las formas de medir distancias relativas a las galaxias, no hay una “mejor manera” pero algunas son mas efectivas que otras. Edwin Hubble con su compañero de trabajo Milton Humason tuvieron una serie de ideas, la mayoría relacionada con el valor del brillo aparente de las galaxias más brillantes de los cúmulos más ricos, pero ¿ahora? Ahora tu tienes muchos y mejores datos al alcance.

PREQUINTA 4

¿Qué hubieran dicho Hubble y Humason sobre cuál es la mejor aproximación?



**¿Te has dado cuenta que las distancias que manejamos son enormes?
¿Crees que las podamos medir exactamente?**

La verdad es que no podemos medir muy bien estas distancias por lo que siempre hablaremos de errores asociados y por lo mismo siempre hablamos de "estimaciones".

Siempre tendremos un error asociado cuando midamos las distancias, pero hay que tener mucho cuidado con los llamados "errores sistemáticos". Estos errores son aquellos que cometemos en la teoría o en el método y sin darnos cuenta se repite constantemente, generando un error constante.

Por ejemplo, quizás cuando medimos distancias realmente nos estamos equivocando porque existe un factor desconocido que depende de la distancia. Si esto sucede, no obtendremos un buen Diagrama de Hubble.

Como las propiedades de las galaxias varían tanto, cuando decidas usar un método para medir distancias, ¡no lo cambies de repente!, usalo con todos los cúmulos que examines.

Algunos ejemplos de cosas que los astrónomos han intentado como indicador de las distancia relativa son:

- 1-. El tamaño aparente de galaxias de cara con grandes contrastes de galaxia espiral.**
- 2-. El tamaño aparente de galaxias en forma de disco que estén de canto**
- 3-. El brillo aparente de las galaxias más brillantes en un cúmulo de galaxias.**
- 4-. El brillo aparente de la décima galaxia (o tercera, o quinta) más brillante en un cúmulo rico de galaxias.**
- 5-. El tamaño aparente de los cúmulos.**

• DISTANCIAS RELATIVAS A GALAXIAS DE MUESTRA

Ahora que ya conoces algunas manera de determinar distancias relativas a galaxias y cúmulos, estás listo para usar estos métodos para encontrar distancias relativas a algunos cúmulos de galaxias reales.

EJERCICIO 11

Mira la siguiente imagen del SDSS. La imagen muestra tres cúmulos de galaxias en la misma área del cielo.



Mira cuidadosamente la imagen y decide qué galaxias pertenecen a qué cúmulos. Escribe algunas notas sobre los criterios que ocupes.

**EJERCICIO 12**

Ahora busca las distancias relativas a las galaxias del ejercicio 11.

Abre la ventana de la "Navigation Tool".

(<http://cas.sdss.org/dr6/en/tools/chart/navi.asp?ra=178.27&dec=1.025>)

La herramienta se abrirá en un área de la imagen de arriba: **RA= 178,27, DEC= 1,025**. Usa el zoom (las lentes y los rectángulos azules al lado izquierdo de la ventana) para agrandar o achicar la imagen. Haz click en el botón "**NWSE**" para cambiar parte del cielo mostrado en la ventana principal. Usa los botones de zoom y de "**NWSE**" hasta que veas en la ventana de la "**Navigation Tool**" lo que viste en el Ejercicio 11.

Luego, haz click en la casilla "**specObjs**". La ventana principal se recargará con cuadrados rojos alrededor de todas las galaxias a las cuales el SDSS le ha tomado un espectro.

Mide una propiedad de cada galaxia que ves marcada con un cuadrado rojo.

De tus resultados, calcula la distancia relativa a cada galaxia con respecto a la más cercana (que tendrá una distancia relativa 1).

Graba tus resultados como una tabla con el siguiente formato: ID del objeto, ascensión recta, declinación, resultado (de la propiedad medida), distancia relativa. Luego, haz click en "Add to Notes" para grabar cada galaxia en tu cuadernillo.

Usa la misma planilla que en el ejercicio anterior. Lanza la "**Navigation Tool**" (<http://cas.sdss.org/dr6/en/tools/chart/navi.asp>) (la herramienta se abrirá en la misma ventana que la "Object Explorer Tool").

**EJERCICIO 13**

Repite el ejercicio 12 para los mismos cúmulos usando distintos métodos para estimar distancias relativas. Agrega dos columnas a la derecha de tu tabla con tu segundo resultado de la propiedad medida y la segunda distancia relativa.

¿Cómo se comparan las estimaciones de las distancias a los cúmulos ? ¿Cuál es la mejor? ¿Por qué?

• CORRIEMIENTOS AL ROJO (REDSHIFTS)

En la primera sección, usaste el SkyServer para mirar los redshifts de 12 galaxias. Esta vez, aprenderás como calcular los redshifts por ti mismo. Si cualquiera de las siguientes palabras o conceptos no son familiares para ti, lee acerca de ellos en cualquier texto introductorio de física o astronomía (Wikipedia puede servir, ¡Pero ten cuidado! La información presentada allí no es muy confiable) antes de que empieces a trabajar:

Espectro

Líneas (absorción, emisión)

Longitud de onda

Ángstrom

Serie o Líneas de Balmer

Efecto Doppler

Los astrónomos aprenden un sorprendente número de cosas de analizar el espectro de las estrellas, galaxias y cuásares. En esta sección, nos focalizaremos en una de ellas: aprenderemos como medir el redshift de una galaxia desde su espectro y aprenderemos como interpretar y usar este valor.

• MIDIENDO REDSHIFTS

La medición de redshift o blueshift, consta de cuatro pasos:

1. Obtener el espectro de un objeto (en nuestro caso una galaxia) que muestre líneas espectrales.
2. Del patrón de líneas, identificar que línea corresponde a cada átomo, ión o molécula.
3. Medir el cambio de cualquiera de esas líneas con respecto a la longitud de onda esperada, como es medido en un laboratorio en la Tierra
4. Aplicar la fórmula que relaciona la velocidad del cambio observado a través del campo visual.

Un ejemplo te ayudará a ver como funciona todo esto:

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, y éste es visto frecuentemente en galaxias cuyos gases se vuelven ionizados. El espectro de cada región muestra un patrón llamado Serie de Balmer de líneas de emisión.

Si bien el agente energizante que hace que el gas brille en la tierra no es el mismo que en las galaxias, el espectro es el mismo.

Las longitudes de onda en condiciones normales de las líneas de Balmer son las siguientes:

NOMBRE	COLOR	LONGITUD DE ONDA (ÅNGSTROMS)
Alfa (α o también α)	Rojo	6562,8
Beta (β o también β)	Azul-Verde	4861,3
Gama (γ o también γ)	Violeta	4340,5
Delta (δ o también δ)	Violeta oscuro	4101,7

Tabla1: Longitudes de onda de la serie de Balmer.

El redshift, simbolizado por z, está definido como:

$$1 + z = L_{\text{observada}} / L_{\text{reposo}}$$

Por ejemplo, si tomamos la línea gama de Balmer:

$$1+z=4780/4340,5=1,1$$

Por lo que:

$$z = 0,1$$



Nota que si la longitud de onda observada fuera menor que la longitud de onda en condiciones normales, el valor de z, sería negativo – lo que podría decírnos que tenemos un blueshift, es decir, que la galaxia está acercándose a nosotros. Se ha encontrado que casi toda galaxia en el cielo tiene un redshift en su espectro.

Eligiendo ya sea la línea alfa, beta o delta, producirían todas $z=0,1$ – la medición del desplazamiento no depende de la línea escogida. Si éstos resultados no son obtenidos (dentro de los errores de medición, por supuesto), entonces lo más probable es que no hayas hecho la identificación correcta de por lo menos una de esas líneas



EJERCICIO 14

Usando el “SkyServer”, mira el espectro del objeto con ID = 582102012537667624. Puedes encontrar el espectro usando la herramienta “**Get Spectra**”, en “Plate 401/51788”, “Fiber 161”.

Este espectro viene de una galaxia, y como muchas otras, muestra líneas de emisión marcadas. Las líneas del hidrógeno ya son conocidas para ti: el peak más alto se produce en la línea a, y el otro peak a su izquierda es la línea b.

Una vez que el patrón se vuelva familiar para ti, deberías ser capaz de reconocer esas líneas en cualquier espectro, incluso en uno sin marcar.

Fíjate en las longitudes de onda de las líneas de Balmer en el eje X del espectro y verifica los datos de esta tabla 18.

Lanza la herramienta “**Get Spectra**”.

• INTERPRETANDO LOS REDSHIFTS

Acabas de calcular directamente el redshift de una galaxia. La cantidad z, que usaremos muy a menudo, es adimensional (no tiene unidades), y dado que es derivada directamente de los datos, su valor no es ambiguo. Sin embargo, a veces esperamos expresar el resultado en unidades, como la velocidad de la galaxia con respecto a nosotros, en km/seg.

Convertir desde el redshift z a velocidad v, medida en km/seg. es simple. La fórmula es:

$$v = c \times z$$

Donde c es la velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^5$

Así, en el ejemplo la galaxia 582102012537667624 aparece moviéndose hacia nosotros a una velocidad de $0,1 \times 3 \times 10^5$ km/s = 30,000 km/s

La fórmula es equivalente a $z = v/c$, y como ves, esta contiene un significado del valor de z: mide la velocidad de la galaxia relativa a la velocidad de la luz.

Viéndolo de este modo, se simplifica bastante el concepto, pero hay dos importantes requisitos en los cuales debemos fijarnos bien. Primero, la fórmula $v = c \times z$ es válida sólo cuando z es pequeña comparada con 1,0 (por ejemplo, 0,1).

Para grandes velocidades cercanas a la velocidad de la luz, se necesita una fórmula más complicada para derivar una velocidad v exacta de la medición de redshift z.

Segundo, generalmente cuando hablamos de la “recesión de galaxias”, implica el movimiento a través del espacio, de hecho hablamos de que la idea de un universo en expansión es que el espacio se está expandiendo por sí mismo:

Las galaxias no se están moviendo a través del espacio, sólo se están “dejando llevar” por el espacio que se está expandiendo (esto se explicará en detalle en la sección final). Al observar una imagen, el redshift de una galaxia no tiene que ser interpretado como una velocidad, aunque el redshift observado se observe tal como un cambio producido por el Efecto Doppler.

Hablando en el contexto cosmológico, el redshift nos dice la escala relativa del universo en el momento que la luz deja la galaxia. Supongamos que la distancia de nosotros a la galaxia 582102012537667624 observada es $d(z)$, la que está dada por la luz que dejó la galaxia en algún momento y que recién ha llegado a nuestra visión (para tener una noción de esto, para $z = 0,1$, el tiempo transcurrido desde ese momento es aproximadamente hace mil millones de años atrás).

En esos millones de años, el espacio en el universo se ha expandido, así que ahora la separación de nuestra galaxia y la galaxia 582102012537667624 es $d(0)$, entonces:

$$1 + z = \frac{d(0)}{d(z)}$$

Interpretamos ésta fórmula como sigue:

El tiempo correspondiente al redshift igual a $z = 0,1$, todas las galaxias estaban un 10% más cerca. También podemos decir que el universo se ha estirado por el mismo factor en el que se han estirado las longitudes de onda. Una medición de $z = 0,2$ corresponde al tiempo cuando las galaxias estaban un 20% más cerca de lo que están ahora, y así.

PREGUNTA 5

En la base de datos del “SkyServer” se pueden encontrar redshifts de quásares que tienen $z > 1$. ¿Hay algún problema conceptual si el redshift es interpretado como un cambio en la velocidad debido al Efecto Doppler? ¿Hay algún problema conceptual si el redshift se interpreta como el estiramiento cosmológico del espacio?



Lee esta sección sólo si quieres saber con mayor profundidad en la interpretación de z . Si no, puedes saltar al Ejercicio 15 directamente si lo deseas.

Hay realmente dos tipos de redshifts, cada una con su interpretación. Algunos redshifts son dinámicos – que surgen de objetos en movimiento (por ejemplo, dos estrellas en órbita girando sobre ellas mismas); otros redshifts surgen de la expansión cosmológica del espacio descrito más arriba. Si estás observando estrellas, la interpretación del Efecto Doppler de redshift es completamente adecuada.

Raramente tendrás que preocuparte sobre la exactitud de la fórmula $v = c \times z$ porque v es casi siempre pequeña comparada con c .

Las galaxias también tienen movimientos dinámicos con respecto a sus vecinas – galaxias binarias que orbitan otras, y galaxias que tienen órbitas complicadas dentro de grupos o cúmulos.

Las galaxias solitarias pueden sentir atracción gravitacional de las masas colindantes, y pueden moverse a través del espacio como resultado de esta gravedad. Todas esas velocidades son también mucho más pequeñas que la velocidad de la luz, y por ello, puedes usar la fórmula $v = c \times z$.

Una vez más, en los casos de movimiento galáctico, la interpretación del Efecto Doppler es correcta.

En la aplicación cosmológica, asumimos que los movimientos aleatorios de las galaxias se cancelan a cero en algún volumen.

Cuando decimos algo como: “El redshift de la galaxia refleja la expansión del espacio” estamos asumiendo que la galaxia está en reposo con respecto a su volumen; es decir, el redshift sólo crece por la expansión cosmológica del espacio.

Aunque, en realidad el redshift de cualquier galaxia tendrá dos componentes: uno dinámico y otro cosmológico. Sin embargo, desde la Tierra podemos medir sólo un número, el redshift z . Sin argumentos externos, no podemos distinguir los dos tipos de redshifts.

Como regla general, para galaxias cercanas ($z < 0,001$), el componente cosmológico es pequeño: la parte dinámica prevalece y podemos pensar en términos de cambios del Efecto Doppler (objetos moviéndose a través del espacio).

Así también, para galaxias distantes ($z > 0,001$), la parte dinámica es más pequeña que la cosmológica, y pensando en términos de los cambios del Efecto Doppler, su velocidad podría ser engañosa. Para redshifts intermedios, $z = 0,003$, las dos componentes son parecidas en tamaño.

En este último caso, ver cuál es cuál es asunto de expertos.

EJERCICIO 15

No todas las galaxias tienen un espectro con líneas de emisión marcadas. Aunque el hidrógeno es lejos el elemento más común del universo, no necesariamente sus líneas espectrales (líneas de Balmer) serán las más notorias en el espectro de una galaxia. Para reconocer patrones de líneas más complicados de galaxias, ayuda juntar una serie de ejemplos de espectros que son característicos en una clasificación.

Ejemplos de clasificación de galaxias incluye aquellas con líneas de emisión marcadas, también sin líneas de emisión pero con características de absorción marcadas, y aquellas que tienen ambos comportamientos. Los astrónomos pueden clasificar los ejemplos anteriores con la plantilla de espectros: Ésta se usa para comparar y conocer los espectros de galaxias con redshifts desconocidos. El SDSS usa nueve plantillas de espectro.

La siguiente aplicación te permitirá usar las plantillas del SDSS para encontrar el espectro de diez galaxias: Elige el espectro que deseas y míralo con la opción "template" del menú desplegable. Compara cada espectro con las nueve plantillas y encuentra la que más se parezca. Despues usa los botones adelante (>>), atrás (<<), "left" y "right" que están al inferior de la página para mover los espectros. Sobre el espectro, la aplicación muestra el redshift que estás probando.

Cuando los montes y valles del espectro desconocido coincidan con los montes y valles de una de las plantillas, ¡has encontrado el redshift del espectro! No intentes coincidirlo perfectamente, sólo preocúpate de obtener la mayor cantidad de peaks y valles parecidos. Ahora que has encontrado la plantilla, escribe el número del espectro en el menú desplegable, y el redshift que encontraste.

Haz [clic aquí](#) para comenzar la aplicación.



• REDSHIFT DE GALAXIAS DE MUESTRA

¡Ya sabemos lo que son los Redshifts y como medirlos! ¡Ahora tenemos las herramientas necesarias para volver a las galaxias de muestra de los tres cúmulos de la sección anterior!



EJERCICIO 16

Abre el cuadernillo online que contiene las galaxias a las que les mediste las distancias relativas en la sección anterior. De los objetos que seleccionaste, al menos cuatro deben tener espectros en la base de datos de espectros del SDSS. De hecho, esas cuatro estaban entre las diez galaxias a las que les encontraste el redshift en el ejercicio anterior.

La tabla de abajo te dice a qué número de espectro del Ejercicio 15 corresponde la "Object ID" de la sección "Distancias". Haz clic en cualquiera de las ID de los objetos para ver los detalles de las galaxias. Escribe el redshift (el valor de z justo abajo del espectro) de cada galaxia. Compara los redshifts

SPECTRUM NUMBER	GALAXY ID
527	587722984423686445
530	587722984423686301
523	587722984423686312
525	587722984423686395

EJERCICIO 17

¿Cuál es el redshift promedio de las galaxias en el Ejercicio 16? ¿Cuál es el redshift promedio en la base de datos del SkyServer? Para encontrarlo, elige unas pocas docenas de galaxias al azar de la base de datos. Encuentra el redshift promedio y grafica un histograma de redshifts. ¿Cuál es el rango característico de los redshifts? Haz lo mismo con los objetos calificados como quásars, ¿Cuál es su redshift promedio y cual es su rango?

La manera mas fácil de examinar muchos espectros de una vez es usar la herramienta "Plate Browser". Elige cualquier placa del menú, luego haz click en cualquier link de galaxias para ver el espectro. El redshift es el valor de z escrito en cada espectro.

• EL DIAGRAMA DE HUBBLE

En las últimas dos secciones has seguido los mismos pasos que Edwin Hubble en 1929. Ahora queda la tarea más interesante de todas: ¡Hacer el Diagrama de Hubble, uniendo los datos para aprender algo sobre el universo!



• El Diagrama de Hubble y el Big Bang

El descubrimiento clave que llevó a los astrónomos a imaginarse el Big Bang fue la relación lineal que buscamos entre la distancia y el redshift en el Diagrama de Hubble.

Hubble hizo dos importantes observaciones que lo llevaron a imaginarse esto. Primero, la relación que buscamos no depende de la dirección del cielo, ¡En cualquier dirección observamos el mismo efecto: Las galaxias mas lejanas se alejan más rápido!

Por otro lado, contando las galaxias en varias direcciones del cielo y a varias distancias, nos encontramos con que el espacio está uniformemente distribuido, en promedio, con galaxias (promediando su tendencia a acumularse).

De la segunda observación podemos inferir que nuestra región de espacio no es especial: Nosotros no vemos ningún borde o algo parecido en ninguna de las direcciones, ¡Que todas las galaxias parezcan estar alejándose de nosotros no significa que seamos el centro del universo!

Todas las galaxias verán lo mismo, estadísticamente hablando: Un observador en cualquier otra galaxia que haga un Diagrama de Hubble verá lo mismo que nosotros.

Esto es exactamente lo que se observa si se asume que todo el espacio se está expandiendo uniformemente donde las galaxias sirven como "marcadores" de la expansión del espacio.

El modelo de expansión del universo no hubiera funcionado si Hubble hubiera visto otra cosa que no fuera la relación que se observa en su diagrama.

El término "Big Bang" parece indicar una explosión en algún lugar del espacio, con partículas propulsadas a través del espacio. Si esto fuera cierto, con respecto al sitio de la explosión, las partículas mas rápidas hubieran viajado mucho más, llevando a una relación lineal entre la distancia y la velocidad.

Pero éste NO ES el concepto detrás de la idea cosmológica del Big Bang. El modelo de explosión es de hecho mucho mas complejo que el modelo cosmológico del Big Bang:

Debes decir por qué hubo una explosión en ese lugar y no en otro; qué distingue las galaxias en el borde opuestas con las que están mas cerca del centro, etc. En la idea cosmológica, todos los lugares y galaxias son equivalentes: Todos ven lo mismo, no hay centro ni borde.

Hubble no midió los redshifts por sí solo: ¡Ellos ya habían sido medidos para docenas de galaxias por un astrónomo llamado Vesto Slipher! La contribución clave de Hubble fue estimar las distancias a las galaxias y cúmulos y darse cuenta de la "tendencia" que seguían sus datos en su diagrama.





PREQUINTA 7

¿Cuáles son los pasos lógicos a seguir en el argumento que llevan desde la línea recta que observas al concepto de que el universo se está expandiendo? ¿Qué necesitaste asumir para argumentar esto? ¿Puede alguno de esos argumentos que asumiste ser probados con el SkyServer?

Los datos que tienes hasta ahora han demostrado la relación entre la distancia y el redshift, ¡Esto implica que el universo se está expandiendo! Aún así... ¿No será esto una coincidencia de nuestros datos? Quizá esto solo sucede en las regiones del cielo que nosotros estábamos observando.

El mismísimo Edwin Hubble tuvo dificultad probando su teoría, viéndose agobiado por las mismas preguntas que acabas de leer.

Luego de anunciarlo en el año 1929, se unió al astrónomo Milton Humason con el que se embarcó en un programa sistemático para hacer el diagrama con muchos mas datos... ¡Luego de mirar a miles de galaxias tuvieron éxito en el año 1937! ¡En éste año, la relación entre el redshift y la distancia quedó firmemente establecida por sus observaciones!

¿PODRÁS PROBARLA TÚ?

PROYECTO FINAL

Vuelve a los datos del SkyServer y repite los pasos por los que pasaste en las secciones “Distancias” y “Redshifts”.

Escoge galaxias y cúmulos de los datos y usa varios métodos distintos para encontrar distancias relativas. Luego, encuentra sus redshifts usando o tus plantillas o los redshifts dados por el SkyServer.

La forma más fácil de examinar un gran número de galaxias es usando la “Navigation Tool” en conjunto con la “Búsqueda Radial” (un tutorial para aprender a usar la Búsqueda Radial lo puedes encontrar [aquí](#)) o la “SQL Search Tool” (un tutorial lo puedes encontrar haciendo [clic aquí](#), en formato PDF).

Crea otro Diagrama de Hubble usando todos tus nuevos datos. Trata de hacer el diagrama lo mas detallado posible y trata de hacer el ajuste de la línea recta lo más acertado posible.

¡ENVÍANOS TU TRABAJO!