

# 1 Introducción

En nuestros días somos afortunados de tener mucha tecnología a nuestro alcance, me refiero específicamente a las computadoras personales (sistemas operativos, unidades centrales de procesamiento, memorias de acceso aleatorio, discos para guardar mucha información), algoritmos y programas de computadora para análisis de datos (estadística, gráficas, presentaciones), la comunicación entre computadoras (envío y recepción de documentos, imágenes, archivos de video, música, etc.) y el desarrollo de internet.

El internet nos ha proporcionado la capacidad de *ver* en la pantalla información sobre casi cualquier tema, existen los denominados libros electrónicos, música, películas, imágenes, acceso a revistas que en otra época y aún ahora son volúmenes impresos y que se resguardan en bibliotecas, etc. En particular en astronomía casi cada centro donde se realiza investigación científica en astrofísica teórica u observacional tiene una página en la red la cual se puede acceder desde cualquier lado en el mundo; existen catálogos de imágenes astronómicas creando así lo que se conoce como observatorios virtuales. Es innegable la importancia que representa el tener acceso a miles de datos (imágenes en luz visible, en ondas de radio, en rayos X, en rayos ultravioleta UV, en ondas de radio que proviene de moléculas y de átomos, etc.).

Sin embargo toda esta información a través de la computadora nos hace olvidar con mucha facilidad de la historia. En particular en astrofísica los conocimientos actuales son el resultado de los esfuerzos intelectuales de muchos científicos a través de la historia reciente de la humanidad.

Es el objetivo de las primeras lecciones describir algunos pasajes de esta historia, en particular relacionados con el tema de nuestro curso: las galaxias, que han sido importantes y que nos dan las bases para llegar a lo que conocemos en los inicios del siglo XXI sobre galaxias y hacia donde están enfocados los esfuerzos para continuar con la *producción* de nuevos conocimientos.

## 1.1 Observación de Objetos Brillantes Extendidos



Figure 1: Imágen en luz visible del cometa Halley (© <http://www.astromia.com>)

Curiosamente el inicio del estudio de galaxias externas está asociado con la observación de objetos de dimensiones extendidas, no de dimensiones puntuales (como las estrellas y planetas a simple vista) que en general se les denominó nebulosas y entre esas nebulosas están los cometas. Quizás, entonces, podríamos iniciar en la época de la edad media y el inicio del renacimiento en

la civilización occidental (occidental simplemente porque está mejor documentada y tenemos acceso a ella, no porque en otras civilizaciones no se hayan generado conocimientos científicos). En esa época mucha gente observaba que en el cielo de vez en cuando aparecían objetos adicionales a los ya conocidos, el Sol, la Luna, las estrellas y con ellas las constelaciones, las estrellas errantes ó viajeras (que conocemos ahora como planetas), me refiero a objetos brillantes pero que no eran de dimensiones puntuales sino que eran objetos extendidos. Su morfología era un poco peculiar: al frente se observaba un objeto brillante de forma casi siempre aparentemente circular pero se observaba *detrás* una estructura difusa en forma curva o en algunos casos lineal. Esos objetos, como se mencionó anteriormente, aparecían de vez en cuando y la gente a finales de la edad media y quizás todavía al inicio del renacimiento los asociaba con catástrofes como derrumbes, terremotos, enfermedades, etc. Sin embargo, por ejemplo, Galileo, Kepler los observaban pero no sabían su origen ó por ejemplo si eran parte de algún fenómeno físico en la atmósfera terrestre ó eran objetos externos a la Tierra.



Figure 2: Nebulosa planetaria PN G084.9+04.4 en emisión de nitrógeno [NII] (© Tula Bernal, IA-UNAM)

Años después el astrónomo inglés Edmund Halley (1656 - 1742) se interesó en las notas de las observaciones de un objeto que apareció en el cielo en los años 1531, 1607 y en 1682. Para esas épocas ya se había aceptado el modelo de Copérnico del Sistema Solar en donde son las estrellas errantes ó planetas los que se trasladan alrededor del Sol en órbitas elípticas. Halley después de estudiar, analizar y razonar, dedujo que el objeto podría ser un objeto perteneciente al sistema solar y, lo más importante, que podría ser ¡ el mismo objeto!, es decir, un objeto que se traslada alrededor del sol en una órbita muy elíptica y es visible desde la Tierra sólo cuando está cerca del Sol. Halley publicó su libro con estos estudios en 1705 donde señalaba al objeto como lo que denominamos ahora un cometa con un periodo (intervalo de tiempo en completar una órbita alrededor del Sol) de 76 años y predecía que se volvería a observar en 1758, pero el murió antes y nunca pudo observar al cometa otra vez. La figura 1 muestra al cometa Halley en 1986; su proxima aparición será en 2061.

¿ Porqué ese objeto, denominado cometa, sólo se puede observar cada 76 años, en comparación con otros miembros del Sistema Solar, como los planetas, que se observan *casi* siempre? La respuesta es que los cometas son objetos que *no* producen su propia luz, como el caso de los planetas, pero al contrario de los planetas, los cometas son muy opacos y cuando se encuentran muy lejos del Sol casi no reflejan su luz (eso indica que la naturaleza de su materia

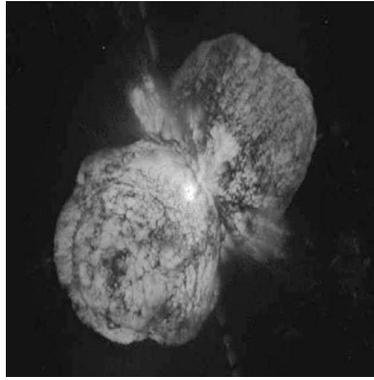


Figure 3: Nebulosa asociada a la estrella *eta carina*, (© NASA, Centro Científico del Telescopio Espacial, STScI)

ó constitución es tal que no refleja mucho la luz que recibe, lo que ahora conocemos como bajo albedo) y sus dimensiones son muy pequeñas en comparación a un planeta, por ejemplo pueden medir entre unos 20 km y 50 km de diámetro con un material poroso. Al viajar cerca del Sol el cometa siente la presión que ejerce el viento solar y eleva su temperatura evaporando mucho de su material en su superficie. Es este material el que forma parte de la estructura extendida en forma de cola que finalmente se queda en el espacio interplanetario y en el lugar geométrico de la órbita del planeta. El cometa aparece brillante porque el material se evapora y refleja la luz del Sol.

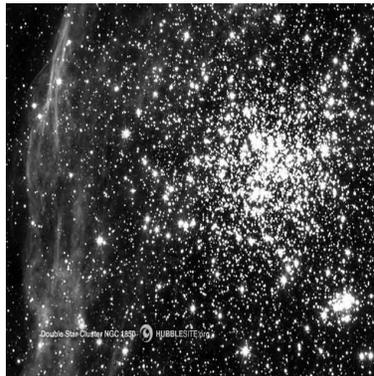


Figure 4: Cúmulo de Estrellas conocido como M3 (© Digital Sky Survey, Caltech, NASA)

El descubrir cometas era una tarea no fácil de realizar, dado que involucra mucho tiempo de observación del cielo y distinguir objetos muy débiles que se mueven con respecto a las estrellas. En la época de Halley al que descubría un cometa se hacía merecedor de una distinción por parte de quizás la comunidad científica y por parte del gobierno ó la familia real. Para los cazadores de cometas era importante tarea observar el cielo y en especial observar objetos extendidos. Sin embargo no todos los objetos difusos son cometas; existen también nebulosas planetarias, remanentes de supernovas y *galaxias*. El astrónomo francés Charles Messier era otro gran observador del cielo y decidió observar varios objetos extendidos que no fueran cometas y crear un catálogo; el catálogo contiene 105 objetos y la nomenclatura es tal tiene la M y el número,

por ejemplo M67 sería el objeto 67 del catálogo de Messier (actualmente hay muchos catálogos de objetos en el universo y muchos objetos aparecen en diferentes catálogos). El catálogo de Messier contiene lo que actualmente conocemos como nubes de reflexión, nebulosas planetarias, remanentes de supernovas, cúmulos de estrellas, y galaxias; se publicó en 1781. Los objetos en ese catálogo deberían ser ignorados por los astrónomos caza cometas. En esas épocas todos los objetos en el catálogo Messier eran simplemente objetos extendidos pero no se conocían sus orígenes ni sus propiedades físicas incluyendo obviamente lo relativo a las galaxias denominadas genéricamente *nebulosas*.

Las *Nebulosas* eran objetos controversiales y a finales del siglo XIX la Nebulosa de Andrómeda fué objeto de estudio detallado que eventualmente abriría un nuevo tema de estudio para entender el Universo extragaláctico.

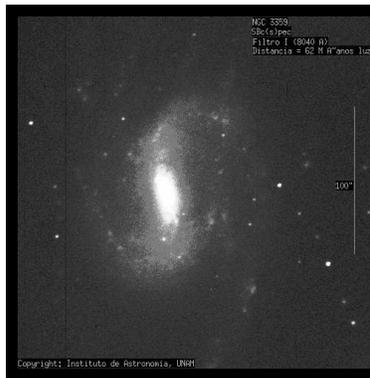


Figure 5: Galaxia de disco con barra conocida como NGC 3359 en el filtro de luz visible rojo,  $8400 \text{ \AA}$  , (© IA-UNAM)

Relativamente al mismo tiempo que Messier estaba elaborando su catálogo, un músico de origen alemán se mudaba de Hannover a Londres y a la edad de 35 años se interesó por la astronomía después de haber leído un libro, su nombre era William Herschel; decidió contruir varios telescopios ópticos por sí mismo y pasó mucho tiempo observando el cielo oscuro. Su tenacidad dió frutos en 1781, cuando a la edad de 43 años descubrió el planeta Urano.

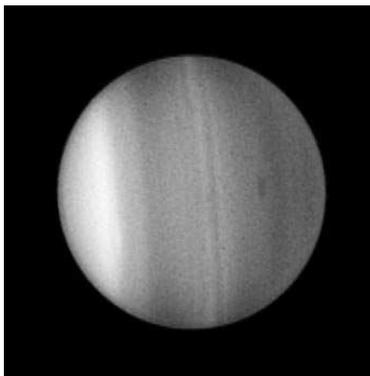


Figure 6: Imágen del planeta Urano con el telescopio espacial Hubble, (© NASA)

Fué Galileo quien a través de sus observaciones dedujo que la banda brillante en el cielo estaba compuesta de miles de estrellas. W. Herschel pensó que el Sol podría ser una estrella que formase parte de la Vía Láctea. Él fué el primero en determinar la posición del Sol en nuestra Vía Láctea. Él razonó que podría deducir la localización de nuestro Sol dentro de esta banda brillante de estrellas realizando un conteo simple de estrellas en varias direcciones. En 1785 publicó sus resultados de conteo de estrellas en 683 diferentes regiones de la bóveda celeste y concluyó que el Sol se encontraba en el centro. A pesar de que el resultado era erróneo, las ideas de Herschel fueron innovativas y dramáticas en su tiempo. El dibujo de la distribución de las estrellas se muestra en la figura 7.

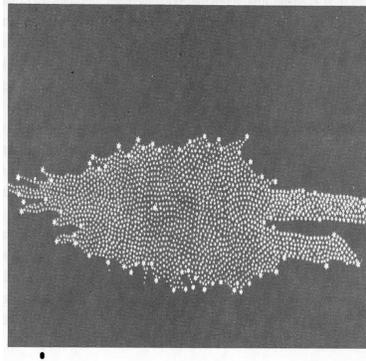


Figure 7: Dibujo de la forma y dimensiones de la Vía Láctea deducida del minucioso conteo de estrellas hacia centenas de diferentes regiones en la bóveda celeste por William Herschel. (© W.H. Freeman and Company)

Mientras observaba la bóveda celeste se dió cuenta de que en el cielo existen miles y miles de objetos difusos ó extendidos y que Messier sólo había incluído en su catálogo los objetos más brillantes, los objetos que *no* se deberían confundir con cometas. Herschel siguió intrigado por esos objetos difusos y extendidos y continuó con sus observaciones; al cabo de varios años había descubierto y catalogado más de 2,000 objetos extendidos ó nebulosas.

En realidad tomó muchos años descubrir más nebulosas en toda la bóveda celeste y fué el hijo de William, John Herschel el que continuó las observaciones. En 1864, John Herschel publicó el *Catálogo General de Nebulosas*, que en inglés se conoce como *The General Catalog of Nebulae* el cual contenía alrededor de 5,079 objetos. En 1888, diecisiete años después de la muerte de John Herschel, el catálogo fué revisado y actualizado por John Dreyer para incluir en total 7,840 nebulosas y cúmulos. La versión final de Dreyer, *El Nuevo Catálogo General*, en inglés *The New General Catalog, NGC*, se publicó en 1895. Este catálogo en corto tiempo contó con dos suplementos, los *Catálogos Indexados*, en inglés *The Index Catalogs*. Entre el catálogo principal y los indexados se incluían alrededor de 15,000 nebulosas y cúmulos que se observaban a simple vista sin la ayuda de la fotografía.

Todavía en nuestros días los astrónomos utilizan los números NGC, IC, ó M para las nebulosas y cúmulos estelares en el visible.

A finales del siglo XVIII, el Inglés Thomas Wright especulaba que algunas de esas nebulosas podrían ser grandes sistemas de estrellas similar a nuestra Vía Láctea. Sus ideas fueron ignoradas casi por todo mundo excepto por el famoso filósofo Alemán Emmanuel Kant. En 1755

Kant extendía las ideas de Wright en favor de lo que denominó *universos islas* como grandes sistemas en forma de disco con miles de millones de estrellas en el espacio. Sin embargo tanto las ideas de Wright como las de Kant no tenían ninguna base científica que las apoyaran y por lo tanto fueron ignoradas por igual.

Otro Inglés William Parsons, era rico y le gustaban las máquinas y lo más importante estaba fascinado con la astronomía y se dió a la tarea de construir grandes telescopios. En 1845 su telescopio estaba terminado con  $\sim 180$  cm de diámetro. Descubrió, con su telescopio, que varias de las nebulosas de Herschel en realidad eran sistemas de muchas estrellas y daba una prueba observacional de que muchas de las nebulosas eran cúmulos de estrellas; así mismo descubrió que la nebulosa M 51 presentaba una figura de zonas brillantes curvas similares a una espiral. Parsons concluyó que M 51 era una gran nebulosa formada de estrellas en rotación alrededor del centro. M 51 y M 31 (Andrómeda) llegaron a conocerse como las *nebulosas espirales*.

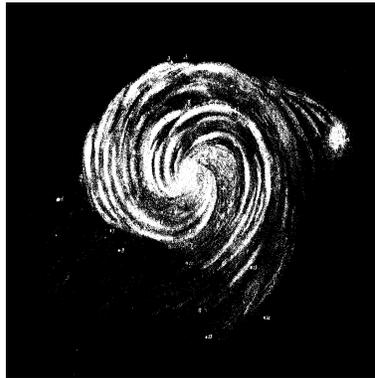


Figure 8: Dibujo de la nebulosa M 51 de acuerdo a las observaciones de William Parsons. La Nebulosa presenta varias zonas brillantes, curvas y elongadas, forma que se asimila a una espiral. (© W. H. Freeman and Company)

En 1908 se completaba la construcción del telescopio de 152 cm de diámetro (60 pulgadas en el sistema inglés) en el Monte Wilson, cerca de Pasadena, California y se inició la era de tomar fotografías de muchas nebulosas en la bóveda celeste. Diez años después, otro telescopio ahora de 254 cm de diámetro se había contruido y la calidad de las fotografías incrementó aún mas.

Sin embargo todavía existían las preguntas ¿qué son esas nebulosas espirales? ¿son objetos que pertenecen a Nuestra Vía Láctea o son objetos que están fuera, a grandes distancias? Al filósofo E. Kant (alrededor de 1755) le gustaba la idea de que esas nebulosas espirales fueran grandes objetos y estuvieran a grandes distancias fuera de la Vía Láctea formando objetos similares a la Vía Láctea; él las denominó *universos islas* aunque no tenía ningún argumento físico que respaldara sus ideas por lo que quedaron solamente a nivel filosófico y olvidadas por mucho tiempo.

Sin embargo muchos astrónomos se inclinaban a finales del siglo XIX a la idea de que esas nebulosas espirales estuvieran constituidas por grandes conjuntos de estrellas rotando alrededor de su centro pero que fueran parte de la Vía Láctea como otros objetos en el catálogo Messier, en el Catálogo General Nuevo (con siglas en inglés como NGC) y en el Catálogo Indexado (en inglés Index Catalog ó IC). La determinación de distancias a diferentes nebulosas ó cúmulos

estelares no era la adecuada y en forma errónea muchos astrónomos concluían que las nebulosas espirales estaban a distancias pequeñas comparadas con el diámetro estimado de la Vía Láctea. De hecho hubo un gran debate en las instalaciones de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de Norteamérica a principios del siglo XX entre los astrónomos H. Shapley (del Observatorio en Monte Wilson, cerca de Pasadena) quien proponía que las nebulosas eran parte de la Vía Láctea, y H.D. Curtis (del Observatorio Lick, cerca de San Francisco) quien proponía que las nebulosas espirales eran objetos fuera de la Vía Láctea. Al final, no se llegó a ninguna conclusión definitiva, lo más probable por falta de las observaciones adecuadas para fundamentar los argumentos en pro ó en contra.

## 1.2 Determinación de Distancias a Estrellas y Nebulosas Espirales

La determinación de la distancia a diferentes objetos era un tema de gran importancia a principios del siglo XX. En esa época ya se habían iniciado las observaciones espectroscópicas, es decir, pasar la luz observada de un objeto a través de un *prisma* y descomponer su luz en diferentes *colores*. El trabajo de James C. Maxwell con su teoría electromagnética fué uno de los trabajos más fundamentales, es decir, más importantes a mediados del siglo XIX; Maxwell descubrió que la radiación es el mismo fenómeno físico y lo que difiere son solamente sus propiedades, en particular encontró que la solución matemática a sus expresiones matemáticas era una función que al graficarla, en una dimensión, es una curva suave que aumenta y disminuye su altura con respecto al valor medio, que se puede tomar como cero. Esa función matemática que aumenta y disminuye su altura se parece a lo que se observa en las olas del mar: son ondas; Maxwell las denominó ondas electromagnéticas. Las ondas de radio, la luz infrarroja, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X, los rayos gamma eran todas ondas electromagnéticas solamente con la diferencia una de otra en el intervalo entre una cresta y otra (lo que se conoce comunmente en el vocabulario de la física como longitud de onda). Maxwell al descubrir las ondas electromagnéticas también descubrió que su velocidad de propagación era **finita** y no *infinita* como lo había supuesto el otro gran físico I. Newton. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas era de aproximadamente 300,000 km/seg; y además que el producto de la longitud de la onda por la frecuencia de la onda era igual a la velocidad de propagación de las ondas. El desarrollo de la física atómica y molecular iniciaba a grandes pasos y daba la información necesaria para los astrónomos, por ejemplo, ya para esa época se conocía perfectamente la tabla periódica de los elementos, es decir, que la materia estaba constituida por diferentes átomos. Cada átomo tenía diferente número de protones en su núcleo y diferente número de electrones a su alrededor. Los trabajos experimentales de Max Planck respecto a los electrones, su masa, carga eléctrica y energía junto con los trabajos teóricos de Albert Einstein acerca de la energía de los *fotones* de luz (ondas electromagnéticas) fué importante para determinar la longitud de onda de los fotones que se detectaban en la Tierra de las diferentes estrellas, incluido el Sol, y de las diferentes nebulosas, incluyendo las nebulosas espirales.

Las observaciones espectroscópicas se realizaban con placas fotográficas en donde se observaban *líneas* brillantes y *líneas* oscuras y en general se observaba que las *líneas* eran anchas. En general y siendo breves, las *líneas* brillantes correspondían a gas con átomos en emisión, las *líneas* oscuras correspondían a gas con átomos absorbiendo energía. Una vez que se detectaba la longitud de onda del gas en emisión, se comparaba con la longitud de onda que ese gas tiene en la *Tierra*, es decir, en el laboratorio donde no se *mueve* el gas en su conjunto.

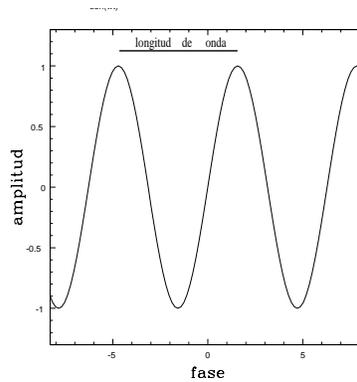


Figure 9: Gráfica de amplitud, en el eje  $y$ , contra la fase, en el eje  $x$ ; se conoce como curva sinusoidal ú onda. La longitud de onda (que se denota por la letra griega  $\lambda$ ) es la distancia entre dos crestas ó dos valles consecutivos, ó en general de cualquier dos puntos similares consecutivos en cada onda. En electromagnetismo, la amplitud de una onda es proporcional a la raíz cuadrada de la energía de la radiación y la fase es proporcional a la suma algebraica de la longitud de onda multiplicada por una constante más la frecuencia de la onda (que se denota por la letra griega  $\nu$ ) por el tiempo. La multiplicación de la longitud de onda por la frecuencia de la onda es la velocidad de la luz (denotada por la letra  $c$ ). La energía de un *fotón* es proporcional a la frecuencia de la onda, es decir,  $E \propto \nu$ .

La diferencia de valores se asociaba al efecto Doppler en donde ondas que viajan hacia el observador disminuyen su longitud de onda, mientras que ondas que viajan alejándose del observador aumentan su longitud de onda. La relación matemática para obtener la velocidad a partir de la diferencia de longitudes de onda es  $v = \frac{\lambda_{observada} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} c$ . Desde incios del siglo XX se obtenían las velocidades de diferentes nebulosas incluyendo las nebulosas espirales. Sin embargo todavía no se conocía la distancia a esas nebulosas espirales.

Al mismo tiempo se hacían observaciones de la cantidad de luz emitida por diferentes estrellas en la bóveda celeste. Algunas estrellas mostraban variación de su luz en forma periodica; a este tipo de estrellas se les denominó estrellas *variables* ó Cefeidas. La variación de su luz en función del tiempo era periódica pero no simétrica, es decir, tomando como base la cantidad de luz normal que emite la estrella, se notaba que aumentaba rápidamente esa luz en cuestión de unos cuantos días y una vez que alcanzaba el máximo de su luz, iniciaba a disminuir en una forma mas gradual; por ejemplo si aumentaba su luz en cinco días, se observaba que disminuía en cerca de treinta y cinco días. Otras estrellas tipo cefeidas mostraban ese mismo patrón pero el cambio era en tiempos diferentes; todas ellas lo que mostraban era que ese cambio de luz era periódico, claro una vez que se habían asegurado que el cambio no era debido al instrumento utilizado ni al astrónomo en turno. La figura ejemplifica ese cambio de luz de una estrella tipo cefeida.

Hubble en 1936 publica su libro que en inglés tiene el título **The Realm of the Nebulae** que se podría traducir como *El Mundo de las Nebulosas* donde reportaba la clasificación de las nebulosas de acuerdo a su morfología y la relación entre la velocidad estimada de las diferencias de longitud de onda de observaciones espectroscópicas y las distancias a esas *nebulosas*.

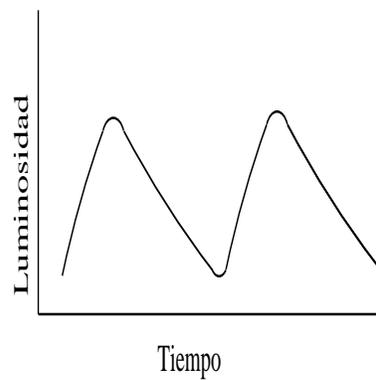


Figure 10: Gráfica de luz recibida, en el eje  $y$ , contra el tiempo, en el eje  $x$ ; se conoce como curva de luz de una estrella tipo cefeida. Note que el aumento es rápido pero la disminución es lenta. La variación es periódica y diferentes estrellas muestran esencialmente la misma forma de la curva, pero diferentes intervalos de tiempo.