

Una mirada epistemológica y didáctica de la Ley de Hubble

Rafael Girola^{1,2,3,4}, Norma Racchiusa¹, Jorge Escudero¹

¹Universidad Nacional de Tres de Febrero, General Enrique Mosconi 2736, Sáenz Peña, Pcia. Bs. As., Argentina.

²Planetario Galileo Galilei, Avenida General Sarmiento y Belisario Roldán, Parque Tres de Febrero, Palermo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Superior de Formación Docente N° 34 Héctor Medici, Ciudad Jardín, El Palomar, Pcia. Bs. As., Argentina.

⁴Asociación EnDiAs, Sarmiento 1503, San Miguel, Pcia. Bs. As., Argentina.

E-mail: rafaelgirola@yahoo.com.ar

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Resumen

Hacia finales del siglo XIX comienzan a descubrirse las primeras evidencias de que las nebulosas espirales, podrían ser galaxias. El estudio de las líneas espectrales desde Joseph von Fraunhofer, aportó una nueva mirada y fue de mucha utilidad para descifrar la naturaleza de las galaxias. A partir de este recurso, podemos decir que la Física amplía su horizonte del conocimiento. Entre los años 1924 y 1929 un astrónomo, Edwin Hubble, con sus observaciones resuelve el debate sobre la naturaleza de las nubes espirales y elípticas confirmando que se hallan más allá de la Vía Láctea, nuestra galaxia, y apreciando su corrimiento al rojo mediante el análisis espectral, descubre el alejamiento de las galaxias. Este trabajo quiere reflejar el escenario del cambio paradigmático desde la Física Clásica, con el aporte de la Astronomía Observacional, dando paso a la Relatividad Especial y la Relatividad General, que predicen y confirman resultados que la Física Clásica no puede responder. Valorizando los aportes del trabajo de los Astrónomos desde su contexto histórico y epistemológico en la enseñanza de la Física. Partiendo de la interpretación de Edwin Hubble hasta el primer modelo relativista auto consistente realizado por Albert Einstein. Se desarrollará una secuencia de la problemática y sus resultados, a través de los marcos teóricos de la Física, mostrando los errores y confirmaciones, sobre la expansión del Universo.

Palabras clave: Nebulosas espirales, Galaxias, Espectroscopia, Corrimiento al rojo, Cambio paradigmático.

Abstract

By the late nineteenth century began to discover the first evidence that the spiral nebulae, galaxies could be. The study of spectral lines from Joseph von Fraunhofer, brought a new look and was very useful to decipher the nature of galaxies. From this resource, we can say that Physics is expanding its horizon of knowledge. Between 1924 and 1929 an astronomer, Edwin Hubble, with his observations, resolves the debate about the nature of spiral and elliptical clouds, confirming that lie beyond the Milky Way, our galaxy, and appreciating their redshift by spectral analysis, check the distance of the galaxies. This work aims to reflect the stage of the paradigm shift from classical physics, with the contribution of Observational Astronomy, leading to Special Relativity and General Relativity, which predict and confirm results that Classical Physics can not answer, valuing the contributions of the work of astronomers from their historical and epistemological context in Physics teaching. Based on the interpretation of Edwin Hubble, to the first self-consistent relativistic model made by Albert Einstein. A sequence of problems and their results will be developed through the theoretical framework of physics, showing the errors and confirmations on the expansion of the universe.

Keywords: Spiral nebulae, Galaxies, Spectroscopy, Redshift, Paradigmatic change.

I. PROPÓSITO

Explicar desde una mirada histórica y epistemológica, el camino que recorre la ciencia, antes de llegar a un cambio de paradigma.

Construir y ejercitar la capacidad de investigación, base de la formación permanente, desarrollando actividades que requieran de la búsqueda de información en diferentes fuentes y en bibliografía especializada.

Este trabajo aspira a incentivar al alumno, a investigar desde el punto de vista histórico y epistemológico, el camino que recorre la ciencia, antes de llegar a un cambio de paradigma.

Si bien la investigación es teórica, consideramos que es relevante, en cuanto a la educación en Física, porque en este escenario, que sería el tránsito del paradigma “De un universo estático a un universo en expansión”, se evidencia el aporte de la Física Clásica a la Astronomía Observacional, tomando como punto de partida, el trabajo de Hubble. Consideramos que esta confrontación teórica entre la Física Clásica, y la Física Relativista, hace visible el tránsito necesario para fundamentar el cambio de paradigma.

Usando la Astronomía como integradora de contenidos de Física, a partir de ese recorte histórico, los alumnos podrán inferir como se llega de la Física Clásica a la “Cosmología Moderna” fundamentada en la Física Relativista.

A. Secuencia Didáctica

Analizar la interpretación de Hubble del corrimiento al rojo de los espectros de las galaxias, considerando los aportes de la espectroscopia y de la Física Clásica.

Reflexionar. ¿Podemos llamar error conceptual al descubrimiento de Hubble, o crisis paradigmática?

Desarrollar las contradicciones de Einstein, que lo llevaron a introducir la constante cosmológica.

Indagar sobre la contribución de la Relatividad General en la interpretación del alejamiento de las galaxias.

Interpretar la importancia del aporte de Lemaitre al cambio paradigmático.

B. Marco teórico de la investigación

La investigación es una herramienta didáctica que nos permite observar los cambios conceptuales y modificar las estructuras cognitivas, tanto individual como grupal.

La metodología investigativa, tiene marcados momentos:

Identificar la problemática.

Explorar ideas previas.

Organizar contenidos.

Definir estrategias.

Seleccionar la información pertinente.

Reconocer diferentes fuentes de información.

Distinguir lo significativo y relevante de la problemática.

Defender y realizar puesta en común del trabajo de investigación. Esto ayuda a generar un ambiente participativo, donde se mejoran los procesos comunicativos individuales y grupales.

Observar y evaluar el proceso que va del conflicto cognitivo y arriba a la adquisición de nuevos aprendizajes. Esta evaluación, realizada en forma permanente, aporta coherencia y unidad al proceso.

II. INTRODUCCIÓN

En el siglo XIX la explicación sobre la naturaleza de las nebulosas espirales y elípticas se hacía bajo el marco de dos pensamientos, la teoría del “Universo Isla” de Kant y Lambert y la “Hipótesis Nebular” de Pierre Simon de Laplace. La primera sostiene que nuestro Sol pertenece a una galaxia, la Vía Láctea y que existen muchas galaxias. En cambio, la segunda afirma que las nebulosas espirales y elípticas son nubes de gas pequeñas, en rotación, desencadenando la formación de estrellas.

Ambas teorías, en parte son ciertas. Existen nubes de gas en contracción originando estrellas. Y existen nebulosas que son sistemas estelares autogravitantes, con miles de millones de estrellas, y existen galaxias de diversas formas. Las evidencias observacionales favorecieron por un buen tiempo la Hipótesis Nebular. Para ello, fue importante la comprensión de la física de los espectros, cuando Fraunhofer se preguntó sobre la naturaleza de las líneas oscuras del espectro solar. El desarrollo de la espectroscopia a manos de los físicos fue de capital importancia en el conocimiento de la naturaleza de los objetos astronómicos. Los astrónomos se dieron cuenta de su importancia y lo utilizaron para observar y comprender la luz de las estrellas, encontrando que los elementos químicos conocidos, también estaban en ellas.

Desde el marco observacional y el marco teórico, la hipótesis nebular de Laplace, dominó la escena del conocimiento, hasta que un precopernicanismo vuelve a instalarse en el marco de dicha teoría bajo argumentos teóricos y observacionales. Uno de ellos fue expuesto por James Jeans, demostrando como

una nube de gas en rápida rotación se contrae y tiende a adoptar una forma de disco, bajo rigurosos argumentos matemáticos y de observación.

William Huggins interpretando erróneamente un espectro de una nebulosa espiral, hoy conocida como galaxia de Andrómeda, argumentaba que las “nebulosas espirales” responden al modelo laplaciano. Pero el mecanismo autocorrector de la ciencia, comenzó a refutar explicaciones, como la del momento angular del Sistema Solar. Si James Jeans tuviera razón, el Sol tendría que rotar más rápido y tener la mayor parte del momento angular del Sistema Solar y no es lo que ocurre.

El campo teórico comienza a debilitarse, como así también la parte observacional con sus respectivas interpretaciones. Al mismo tiempo, cobra importancia la observación de estrellas que explotan, supernovas y novas, apoyando los argumentos a favor de los Universos Islas de Kant-Lambert.

A principios del siglo XX, la Astronomía Observacional tuvo un crecimiento sorprendente en manos de George Hale, fundador de la Astrofísica Observacional. Se construyeron cuatro telescopios de última generación de 1, 1,5 y 2,54 metros. En Monte Wilson mediante la espectroscopia, se resuelve el problema de saber si la Vía Láctea es una galaxia que contiene nebulosas en su interior, o bien éstas son sistemas independientes de la Vía Láctea. Aquí entran en escena astrónomos de primer calibre en aquella época, como Harlow Shapley y D. Curtis. El primero sostenía que las nebulosas están dentro de la Vía Láctea y el segundo que las nebulosas son universos islas, es decir galaxias. Pero Shapley mediante la observación de un cierto tipo de estrellas pulsantes, las variables cefeidas, mide en exceso el tamaño de la Vía Láctea y ubica al Sistema solar en ella, pero no en el centro como si argumentaba Curtis. El problema sobre la naturaleza de las nebulosas espirales y elípticas, se discute en el año 1920 en la Academia Nacional de Ciencias en Washington. Se lo llama el gran debate del siglo XX. El argumento de Curtis sobre si la naturaleza de las nebulosas espirales son galaxias, requería de una observación mediante el telescopio. El trabajo observacional precedente a Edwin Hubble, fue realizado por Vesto Slipher, mediante la obtención de varios espectros de las “nebulosas”. Edwin Hubble descubre estrellas variables cefeidas en otras galaxias determinando distancias, resolviendo que la Vía Láctea es una galaxia y las nebulosas espirales son galaxias. Entiende además, que el corrimiento al rojo, el hecho de que las líneas espectrales de muchas galaxias están corridas hacia el rojo, significa que se alejan respecto al observador.

¿Cómo interpretar físicamente el alejamiento de las galaxias? ¿Qué marco físico responde a la observación? Los astrónomos de aquella época no conocían o tenían una vaga información, sobre el advenimiento de las teorías de la Relatividad Especial y la Relatividad General. Albert Einstein resuelve con sus ecuaciones el problema de la gravedad, que no entra en el escenario de la Relatividad Especial, y construye un modelo cosmológico autoconsistente que no se expande. La Relatividad General en la construcción de los modelos cosmológicos, tiene su evidencia observacional en el alejamiento de las galaxias, cosa de la cual Edwin Hubble, su descubridor, no estaba del todo convencido al argumentar que las galaxias se mueven en el espacio. Edwin Hubble mantiene una postura clásica en un momento de cambio paradigmático en la Física. Quien va a unir la teoría con la observación, es el clérigo belga George Lemaitre, encontrando la respuesta en la Relatividad General, argumentando que es el espacio el que se expande y las galaxias están ancladas en él. La ley de Hubble es la base observacional experimental de la teoría de la expansión, para la construcción de los modelos cosmológicos desde una mirada relativista, aunque se puede hacer una aproximación desde la mirada de la cosmología newtoniana.

III. DESARROLLO

A. Teoría de los Universos islas

Emanuel Kant en el año 1750 fue motivado a fundamentar su teoría de los universos islas a partir de un trabajo publicado en un periódico sobre el astrónomo británico Thomas Wright. El título del trabajo era: "Una teoría original o nueva hipótesis del Universo". Wright, al ser sumamente religioso, mezcla los conocimientos astronómicos con la búsqueda del trono de Dios, situándolo en el centro del Universo. Wright considera que el universo es esférico, ubicando a los astros en capas concéntricas. Las estrellas ocupan la capa más externa, es decir la más alejada del centro. Se puede decir que su modelo es una regresión pre copernicana, equivalente al modelo geocéntrico de Platón, Aristóteles y Ptolomeo. En este caso, es la Tierra la que ocupa el centro del universo. Sobre el Sol, propone que es una estrella más ubicándola sobre la esfera de las estrellas fijas lejanas al centro del universo. El argumento de Thomas Wright sobre la forma esférica en donde se encuentran las estrellas no es bien interpretado por el periodista y resalta la última parte de la explicación. Debido a la poca información del periodista sobre el trabajo de Wright, Kant interpreta erróneamente la forma de cómo describe el universo mediante esferas indicando que lo describe como un plano de estrellas creyendo que esta es la postura que tiene Wright

sobre el universo. Kant a partir del trabajo de Wright con su interpretación equivocada comienza a desarrollar su propia visión del universo. Kant reflexiona así: "Lo mismo que los planetas se encuentran confinados en su movimiento a un plano común -razonaba el filósofo-, las estrellas también están situadas aproximadamente en las cercanías de un plano que se dibuja por el firmamento de manera muy similar a la franja de luz que llamamos Vía Láctea. Pienso que, dado que esa zona, iluminada por innumerables soles, tiene la forma casi exacta de una gran circunferencia, el Sol debe estar situado muy cerca de ese gran plano." Sus argumentos filosóficos se apoyan de alguna forma en el marco de la Física de Newton. En los años de Kant, son observadas las nebulosas elípticas. Es así que a través de un trabajo del astrónomo francés Pierre Louis Maupertius, Kant toma conocimiento de ellas sugiriendo que se trata de una gran cantidad de estrellas y así nace el pensamiento de los universos islas, hoy llamadas galaxias. Sus trabajos son publicados en el año 1755, donde expone teóricamente, la estructura y los conglomerados estelares. El tratado se llama "Historia general de la naturaleza y teoría del cielo", y en él se encuentran las siguientes de Kant. Considera que la Vía Láctea es un sistema constituido por muchos sistemas solares, encontrándose agrupados en una estructura de características parecidas a los sistemas planetarios de forma plana y elíptica, bajo las leyes de la mecánica celeste. Desde lo observacional considera que el Sol se encuentra en el plano de la Vía Láctea debido a la densidad estelar que se observa en ella, perteneciendo a la misma. El pensamiento teórico de Kant afirma la existencia de otros planetas con sus respectivos satélites orbitando alrededor de otras estrellas y que deben existir otras Vías Lácteas, hallándose distanciadas el equivalente al tamaño de ellas mismas, las cuales desde la Tierra son observadas como nebulosas elípticas sin posibilidad de discernir las estrellas que la componen. Las observaciones que responden a la lectura teórica de Kant las llevó a la práctica el astrónomo Maupertius describiéndolas como pequeñas zonas de luz más claras que las zonas oscuras del espacio, pero con una luz más tenue que las que se conocen en el cielo.

B. Hipótesis nebular

En su tratado Kant expresa la hipótesis de cómo surge el sistema solar. Según su punto de vista con los conocimientos de la física y mecánica celeste de su época, escribe que el sistema solar surge de una nube en rotación condensándose. Los grumos que se forman adquieren rotación, asociándose para constituir conglomerados de materia, formándose así los planetas. Uno de los inconvenientes de la hipótesis, es que no desarrolla una explicación de cómo la nube en estado caótico pasa a tener un movimiento rotacional. En el año 1796, Pierre Simon de Laplace escribe un libro "Exposition du système du monde" presentando las hipótesis para explicar el origen del sistema solar a partir de una nube de gas y polvo en rotación. La fuerza centrífuga hace desprender materia suficiente, constituyendo anillos de equilibrio inestable que se fragmentan condensándose, dando origen a la formación de los planetas. Como ocurre con Kant, hay aciertos y errores en sus hipótesis. Por ejemplo, no logra explicar el momento angular del sistema solar, y sí explica bien la diferenciación de los planetas terrestres y gaseosos. Las observaciones de las nebulosas son interpretadas desde el enfoque laplaciano en el sentido que no se trata como arguye Kant de que son universos islas sino que son zonas de formación de sistemas planetarios y por ende que están dentro de un mismo sistema y no fuera de la Vía Láctea.

IV. PRIMEROS PASOS DE LA COSMOLOGÍA MODERNA

La importancia de la Astronomía en el transcurso de los primeros años del siglo XX concierne al establecimiento sobre escalas de distancias en el Universo. ¿Una sola galaxia o una multitud de ellas? ¿Qué tamaño tiene la Vía Láctea? El tema central era comprender si las "nebulosas espirales" eran universos islas (galaxias) como las llamó Emanuel Kant, o si eran nebulosas dentro de la Vía Láctea. Esto generó un replanteo acerca del tamaño de la Vía Láctea y de la distancia a la que se encontraban esas nebulosas. El problema de las distancias comenzó a tener su solución en un simposio organizado por la Academia Nacional de Ciencias estadounidenses el 26 de abril de 1920. Dos astrónomos estadounidenses, Heber D. Curtis y Harlow Shapley expusieron sus argumentos sobre la problemática planteada. Curtis, defendía la idea de los "universos islas" y que el Sol ocupa el centro de la Vía Láctea, mientras que Shapley defendía la postura de que el Sol no se halla en el centro de la Vía Láctea y que vivimos en una gran galaxia. El resultado final de la solución del gran debate, es que el Universo se encuentra poblado de galaxias; que la Vía Láctea es una de las tantas que existen en él; que el Sistema Solar no se halla en el centro de ella sino que se encuentra muy cerca de uno de sus bordes, en uno de sus brazos espirales. Claro está, que todo esto no se obtuvo por deducción lógica, sino que se logró por un trabajo estadístico observacional en relación con la lógica de los resultados, que permitió trazar mejor la "parquización" de

la Vía Láctea y las galaxias externas a ella. El centrismo estaba al borde de ser noqueado por las observaciones y los modelos.

A. Un paso importante: Miss Leavitt

A principios del siglo XX, un grupo de mujeres analizaron una gran cantidad de estrellas, lo que dio origen a la clasificación espectral estelar. En 1912, una mujer comprendió la variabilidad de la luz de un tipo de estrellas que jugarían un rol fundamental en la comprensión del Universo. Se trata de Miss Henrietta Leavitt. Su contribución hacia la cosmología fue lograr comprender la distancia entre las galaxias y el tamaño de la Vía Láctea. Descubrió que la variación de brillo de cierto tipo de estrellas, mantenía una periodicidad pudiendo determinar distancias. Es lo que habitualmente se llama relación periodo-luminosidad de las estrellas cefeidas. Su nombre proviene de Delta Cefeo. Es una estrella en la constelación de Cefeo, en el hemisferio norte celeste. Observaciones previas realizadas en 1783 por John Goodricke, un astrónomo aficionado inglés, permitieron descubrir estrellas que variaban su luz en forma regular, las cuales fueron prototipo de las variables cefeidas.

B. Las cefeidas: Solución de las distancias extragalácticas

¿Cuál fue y cuál es la importancia de estas estrellas? Las cefeidas son estrellas muy luminosas, y eso las convierte en buenas “boyas estelares” para determinar distancias galácticas. Al menos eso ocurre con las más cercanas. Cabe decir que este tipo de estrellas no sólo existen en la Vía Láctea, sino también en otras galaxias, como en las Nubes de Magallanes, galaxias satélites de la Vía Láctea, y en Andrómeda, que junto con la Vía Láctea son las dominantes del llamado Grupo Local de galaxias. Así, Miss Leavitt, trabajando con cefeidas de la Pequeña Nube de Magallanes y de la Vía Láctea, dio el primer paso para la determinación de distancias extra galácticas.

C. El Sol no ocupa el centro de la Vía Láctea y otras sorpresas

Shapley mediante el conocimiento de la relación periodicidad y luminosidad de las cefeidas pudo determinar las dimensiones de la Vía Láctea, dándole un valor superior al tamaño actual considerado, y también logró sacar al Sol de su centro. La descentralización provino del estudio de cúmulos globulares, una región de espacio que puede contener entre cientos de miles a más de un millón de estrellas. Mediante la observación pudo comprobar que están distribuidos en forma asimétrica respecto al Sol pero si simétricos en relación a un centro de la Vía Láctea. Encontró que ese centro está en dirección de las constelaciones de Escorpio y Sagitario ¿el centro de la Vía Láctea es el centro del Universo? El centrismo recobra cierta fuerza en su lenta agonía.

Mediante la contribución de Leavitt y Shapley comienza un debut de una serie importante de trabajos sobre la estructura galáctica, como los trabajos del sueco Lindblad y el holandés Oort en la vecindad local del Sistema Solar en la Vía Láctea. A su vez en el año 1930, Trumpler y Adams desarrollaron las bases del conocimiento de la materia interestelar. El descubrimiento del polvo interestelar que no se había tenido en cuenta hasta entonces, corrigió las mediciones efectuadas de la Vía Láctea, pasando a tener un tamaño mucho menor al considerado inicialmente por Shapley, aproximándose al tamaño actual de unos cien mil años luz. Shapley tenía razón que el Sol no ocupa el centro de la Vía Láctea, pero ¿tendría razón en que es una inmensa galaxia conteniendo a las nebulosas espirales?

D. Monte Wilson, Hale y Hubble: un contexto aplastante para el centralismo del universo

George Hale fue un arduo estudioso del Sol; diseñó un espectroheliógrafo para realizar estudios sobre la atmósfera solar. También realizó estudios espectrales de las estrellas, pero luego se volcó hacia las profundidades cósmicas. Esta motivación lo llevo a construir los grandes telescopios de aquella época. En el observatorio Yerkes construyó el refractor más grande del mundo, de 1 metro de diámetro. Y en California, logró instalar los telescopios de 1,5 y 2,54 metros en el Monte Wilson, y el telescopio reflector de 5 metros de Monte Palomar. Fue director del Observatorio Monte Wilson contratando a Edwin Hubble para que trabajara allí. Hubble analizó la luz de varias estrellas variables cefeidas, pudiendo determinar la primera estimación de la distancia a la que se halla la galaxia Andrómeda de la Vía Láctea, utilizando como “calibración” para obtener la medida, las cefeidas de la Nube Menor de Magallanes. El resultado supera varias veces el tamaño de la Vía Láctea estimado por Shapley. La primera medición fue de un millón de años luz. Con esta observación y medición de la distancia a Andrómeda, le dio el respaldo casi definitivo a Curtis: las nebulosas espirales eran galaxias más allá de

las fronteras de la Vía Láctea. Shapley buscó argumentos en contra de estas observaciones e interpretaciones con resultados adversos a su hipótesis.

Hubble interesado en estudiar espectros de galaxias, y Milton Humason, un encargado del lugar que ganó su confianza, descubrieron una valiosa información. Mediante la comparación, tomando como referencia algún elemento químico común en todos los espectros, se halló que cuanto más alejada se halla la galaxia, el elemento químico presente se corre más hacia la región roja del espectro visible de la luz de la galaxia, por ende, su velocidad es mayor. Conociendo las estimaciones del tamaño de la Vía Láctea y las velocidades medidas, dedujo correctamente que las nebulosas espirales no se hallaban dentro de la Vía Láctea. Con estas observaciones se descubrieron las galaxias, respaldando las observaciones y la hipótesis de Curtis, que la Vía Láctea era una de las tantas galaxias que componen el universo y el descubrimiento más espectacular de todos, que las galaxias se están alejando de nosotros, y cuanto más lejos están, lo hacen con mayor velocidad. El telescopio de Galileo mediante la mirada de Galileo descentralizó a la Tierra. El telescopio de Monte Wilson mediante el trabajo de Hubble descentralizó a la Vía Láctea. ¿Comprendía Hubble su descubrimiento observacional? ¿Conocía trabajos previos sobre la expansión del universo, y aun así se atribuyó para sí mismo el descubrimiento de la expansión del Universo?

E. Interpretación de los resultados según Hubble

Hubble tenía un conocimiento físico desde el marco newtoniano. Por ende, en un principio interpretó que las galaxias se estaban moviendo en el espacio, y no que el espacio las arrastraba. Por ello se apoyó en el efecto Doppler para interpretar el alejamiento de las galaxias. Pero tuvo problemas con valores que se aproximaban a la velocidad de la luz y que inclusive, podrían aparentemente superarlas. Para comprender lo que Hubble había descubierto desde la observación, se requería un conocimiento de la nueva interpretación de la gravedad y su relación con la geometría, tratada por Albert Einstein en la teoría General de la Relatividad. La gravedad ya no se consideraba como una fuerza, sino como una curvatura dada por el espacio mismo, y dependía de la distribución de materia o energía contenida en él.

F. Interpretación de los resultados según el marco teórico físico

Del otro lado del Océano Atlántico entre 1905 y 1917, se habían realizado cambios drásticos en la forma de ver el espacio, el tiempo, la masa, la energía y la gravedad. Hubble tenía muy poco conocimiento de la nueva física que se había desarrollado en los primeros años del siglo XX en Europa. A su vez Albert Einstein tenía información obtenida de los astrónomos, sobre velocidades pequeñas y aleatorias de las estrellas que no concordaban con un universo en expansión, según como describía la Relatividad General en un contexto a gran escala del universo. Consideraba que el universo está en expansión y que un observador desde su lugar verá cómo se alejan las galaxias a velocidades muy superiores a las de las estrellas. Faltaba unir la observación de Hubble en el contexto de la Relatividad General.

Einstein, recurrió a una constante cosmológica para lograr un universo estático y estacionario de acuerdo a las escenas vigentes de la comprensión del universo en los primeros años del siglo XX y de acuerdo a la velocidad de las estrellas. Hubble argumentaba un movimiento llamado “cinemática de las galaxias” explicado por el efecto Doppler, es decir, que las líneas espectrales varían según si la fuente que las emite se acerca o se aleja del observador. La cosmología estaba a punto de tener un carácter teórico observacional, y se logró cuando en el año 1927 el clérigo belga Lemaitre comprendió que el alejamiento de las galaxias está dado por la expansión del propio espacio, que no es por cinemática el alejamiento de las galaxias, sino que son arrastradas por el estiramiento del espacio en el tiempo. Hay muchas maneras de ejemplificar este resultado. Una de ellas es pegar unos papeles que representan las galaxias separadas entre sí por igual distancia, en una sogá elástica. Si apretamos una de ellas con el dedo y estiramos la sogá se verá que las galaxias-papeles se alejarán más deprisa cuanto más lejos se hallan del dedo observador. Pero si hacemos el mismo procedimiento desde otro papel-galaxia, veremos el mismo resultado, y así para los demás papeles galaxias. Los papeles-galaxias siguen estando en el mismo lugar de la sogá, y la razón por la que se alejan es el estiramiento de la sogá que representa al espacio. Este resultado es muy importante, pues la información que nos brinda es que cualquier observador en cualquier galaxia-papel verá el mismo comportamiento. De esto se trata la denominada la Ley de Hubble-Humason-Lemaitre, y con ella, el universo estático y estacionario pasó a ser dinámico y evolutivo. Pero existía un caso especial con la galaxia Andrómeda, que no se aleja sino que se aproxima, y tendrá un encuentro con la Vía Láctea dentro de tres mil millones de años. ¿Cómo se explica este hecho en este nuevo escenario?

G. Consecuencias de la ley de Hubble Humason Lemaitre

Esta ley empírica, está apoyada en un principio cosmológico con evidencias observacionales. Si miramos el universo dentro de un radio de cientos de megapársecs, veremos las mismas propiedades cualquiera sea la dirección en el espacio. Si además a grandes escalas, medimos la densidad del universo, encontraremos que es la misma en cualquier región. Estos dos principios reciben en conjunto el nombre de principio de isotropía y homogeneidad. Estos principios están confirmados por el estudio de la distribución de las galaxias a gran escala del universo. Pero en el vasto océano del universo, se hallan grupos de galaxias que lograron librarse de la expansión a expensas de la gravedad entre sus constituyentes. Esto es lo que ocurre con Andrómeda dentro del Grupo Local de galaxias. Andrómeda no sigue la expansión desde un marco local, sino que es atraída por la Vía Láctea, logrando un equilibrio. Pero un observador lejano vería que ambas siguen la expansión, y que con el tiempo, llegarán a fusionarse en una sola galaxia. El principio cosmológico, la observación de la expansión del espacio y de cómo se alejan los grupos de galaxias a gran escala, muestra que no ocupamos ningún lugar preferencial en el universo sino que, cada observador en el universo tendrá su propia esfera de observación y esta será dinámica. Y que a medida que observa más lejos hacia la frontera, verá como era el universo en el pasado, mucho más denso y caliente, hasta llegar a una frontera que es lo que se denomina la radiación de fondo de microondas. El universo no tiene centro. Pero desde el conocimiento cotidiano, si preguntamos a un grupo de personas, hoy en día si la Tierra es el centro del universo, muchos de ellos posiblemente respondan por un sí.

V. ESQUEMA DEL CONOCIMIENTO ASTRONÓMICO Y FÍSICO PARA REALIZAR EL TRABAJO EPISTEMOLÓGICO DE LA LEY DE HUBBLE

El estudio de los espectros de los cuerpos gaseosos, el conocimiento del espectro del hidrógeno, las series espectrales (Balmer, Lyman, Paschen), el estudio de los espectros de otros elementos químicos interpretando los espectros de emisión y absorción, son la base de la comprensión de la lectura espectral de las galaxias. También contribuyen, en el concepto de distancia: la unidad astronómica, el año luz y el pársec. Mediante el método espectroscópico se pudo encontrar la relación entre magnitudes aparentes, magnitudes absolutas y distancia. La fotometría permite medir los flujos, por ende la luminosidad, relacionándola con la magnitud absoluta.

$$M - m = -2,5 \log \frac{D^2}{D_0^2} = -2,5 \log \frac{D^2}{100} = 5 - 5 \log D \quad (1)$$

Edwin Hubble recurrió con estos conocimientos para medir las distancias de las galaxias. Pero también mediante el estudio de las estrellas variables pulsantes cefeidas, que muestran una periodicidad en el cambio de brillo debido a las pulsaciones que dilatan (enfrian) y contraen (calientan) en forma periódica la materia, ocupando un rol de termostato. Las pulsaciones viajan a la velocidad del sonido. En el modo fundamental el periodo es

$$P = \frac{R}{v_s} = \sqrt{\frac{R^3}{M \cdot G}} \quad (2)$$

Como la base y el radio estelar están relacionadas con la luminosidad de las estrellas, se tiene una relación entre la magnitud absoluta M y el periodo P

$$M = -2,25 \log P - 1,5 \quad (3)$$

La relación periodo luminosidad (P-L) de las cefeidas, fue descubierta estudiando las variables de la nube menor de Magallanes, conociéndose su distancia. Luego se vio la utilidad de las cefeidas para determinar distancias estelares, galácticas y extra galácticas. El estudio espectral de las galaxias, y el efecto Doppler-Fizeau sirvieron como una primera aproximación para comprender el alejamiento de las galaxias, pero desde un contexto de la Física Clásica, que no es el marco teórico para su explicación. Hubble en principio hace la interpretación desde este marco, pero tuvo dificultades con las velocidades de las galaxias observadas, las cuales eran muy elevadas para que sean compatibles con la mirada de la Física Clásica. La Ley de Hubble permite determinar distancias cosmológicas a partir de las medidas de los desplazamientos espectrales admitiendo que: a) La ley es lineal, manteniéndose válida para distancias muy grandes. B) La magnitud aparente m corregida de la extinción interestelar crece en forma sistemática con la distancia. Se tiene un conjunto de espectros de una población de galaxias, se compara con los espectros en el laboratorio en el sistema inercial. Se observa un desplazamiento de las líneas de los

elementos químicos corridas hacia el rojo. ¿Cuál es la causa? Mediante z , que denota el desplazamiento al rojo, que es la diferencia entre la longitud de onda emitida y la observada en el laboratorio en relación a la longitud de onda observada, se puede relacionar con la velocidad de la fuente. Vemos a continuación las respectivas interpretaciones con sus equivocaciones, hasta llegar a la interpretación que une la Relatividad General con las observaciones realizadas por Edwin Hubble.

En el Marco de la Física Clásica, la interpretación de la Ley de Hubble tiene sus inconvenientes pero en principio, se puede trabajar con la conservación de la energía para encontrar modelos del universo. El espectro de galaxias muestra un desplazamiento sistemático de las líneas hacia el rojo (Redshift). Pero $z = \Delta\lambda/\lambda$, donde A (Constante de proporcionalidad) = H_0/c . Es decir $z = (H_0/c)D$ y $z = v/c$ pero a su vez $z = d$. puede tomar valores muy elevados. Hubble pudo encontrar este efecto sistemático observando galaxias próximas, siendo D la distancia conocida y $z < 0,003$ por una ley $v = HD$ donde v expresa el desplazamiento observado en términos de la velocidad de recesión, deducido del desplazamiento de las líneas espectrales hacia el rojo mediante el efecto Doppler Fizeau y H es una constante (Constante de Hubble) que se aproxima a $H = 70 \pm 20$ KM/seg/Mpc. En 1928 el valor de H era de 500. La falta de conocimiento de los tipos de variables cefeidas y la dificultad de medir distancias extra galácticas dieron como resultado ese valor para H . Hubble media z a partir de las líneas espectrales y D a partir de la relación periodo luminosidad de las cefeidas. Esta ley se basa en las observaciones y no se dedujo de ningún modelo. Relaciona el desplazamiento al rojo con las distancias, no con velocidades. La velocidad de recesión se puede interpretar relacionada con el desplazamiento al rojo siempre que no se interprete como un efecto Doppler debido a una cinemática. En un principio Hubble recurre a este argumento clásico. Si se mantiene la postura de la explicación mediante un efecto Doppler, el problema surge cuando z es mayor que 1. Hasta este valor la ley clásica se aproxima muy bien, pero desde este valor en adelante la velocidad es muy importante dejando de ser válido en el marco físico clásico, interpretándose desde el marco de la Relatividad Especial. Cuando z supera el valor 1 se hace difícil la identificación de las líneas espectrales donde las líneas espectrales visibles se desplazan hacia el infrarrojo y las del ultravioleta al visible. La serie Lyman del hidrógeno es dominada por la línea de 121,6 nm. Luego las velocidades de recesión son muy elevadas dejando de ser válida la relación para z mayor a 1 usándose la fórmula relativista deducida por las transformaciones de Lorentz. Veamos un ejemplo desde el marco de la Relatividad Especial mediante las transformaciones de Lorentz para usar el efecto Doppler relativista:

Una galaxia G muestra un redshift $z = 2$. ¿Cuál es su velocidad?

$$\frac{vr}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} = 0,8 \quad (4)$$

Pero no se resuelve el problema. Hubble se inquietaba en el año 1930 con los desplazamientos al rojo $z = 0,1$. Pero que decir en la actualidad con cúmulos de galaxias o cúasares observadas con $z = 6$?

Las galaxias tienen velocidades de fuga o recesión cinco veces o diez veces superior a la velocidad de la luz que es por supuesto un absurdo. Según la Relatividad Especial ningún objeto puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. La fórmula del efecto Doppler Fizeau es por lo tanto falsa para interpretar un corrimiento espectral hacia el rojo, y también el efecto Doppler relativista que corrige la primera tal que las galaxias con gran desplazamiento espectral tienen velocidades debajo de la velocidad de la luz. Luego la mecánica clásica se sustituye por la Relatividad Especial. En este caso para una galaxia con $z = 4$ la velocidad de alejamiento es 92% la velocidad de la luz. Se reemplaza una explicación inexacta por otra que también lo es, pues asimila los desplazamientos espectrales hacia el rojo desde el marco de una teoría del espacio tiempo plano sin gravitación; en la Cosmología la curvatura del espacio tiempo juega un papel crucial.

A. Marco de la Relatividad General

La Relatividad General expande el análisis de la Relatividad Especial introduciendo los efectos gravitatorios. La observación newtoniana de la equivalencia dinámica de la gravitación y de la aceleración se toma como principio.

La gravitación se inscribe como una propiedad geométrica del espacio tiempo cuatridimensional. Las distribuciones de masa y energía se traducen por la curvatura del espacio. Y la luz se propaga siguiendo geodésicas curvas alrededor de las distribuciones de materia y energía. En presencia de materia y energía el espacio es curvo y dinámico. Un universo que puede estar en expansión o en contracción (Friedmann-Lemaitre 1922)

El desplazamiento espectral del corrimiento al rojo (Corrimiento al rojo cosmológico) es precisamente otro fenómeno específico de la Relatividad General. No hay contrapartida ni en la Física Clásica ni en la Relatividad Especial. Según la interpretación de Lemaitre no son las galaxias las que se alejan como proyectiles en el espacio sino que es la textura espacial la que se expande. La curvatura del espacio juega

un rol importante en su evolución y se mide por un factor de escala denotada por $a(t)$ (adimensional) relacionada con $R(t)$, factor de escala dimensional. El radio de curvatura aumenta en el curso del tiempo. Es por ejemplo, el radio de la esfera que delimita el universo observable. El espacio se expande, el factor de escala $a(t)$, aumenta en el curso del tiempo. Las ondas luminosas se estiran en el camino, pues el fotón, más precisamente su longitud de onda, está afectada por la expansión. Es decir el fotón emitido de una galaxia lo hace en un factor de escala a_1 y en el transcurso del tiempo es receptada por una galaxia en un factor de escala a_2 . Luego por la expansión el fotón es de mayor longitud de onda. La fórmula correcta del desplazamiento espectral hacia el rojo desde el marco de la Relatividad General es:

$$1 + z = \frac{a_o}{a_e} \tag{5}$$

Donde a_o es el factor de escala hoy y a_e , el factor de escala del universo cuando la luz fue emitida de una galaxia G . No hay ninguna contradicción. Si $z = 1100$ se trata de la radiación de fondo de microondas. Si a_e se aproxima a 0, el desplazamiento espectral tiende a infinito. Este valor es de suma importancia en Cosmología pues se trata del horizonte cosmológico. Ninguna luz de las galaxias que están más allá de esta frontera nos ha llegado. En términos de la velocidad de expansión, estas regiones alejadas se dilatan a una velocidad que supera la velocidad de la luz. El espacio se puede dilatar con una velocidad más rápida que la velocidad de la luz pues el espacio no representa materia ni energía. (Marco de la Relatividad General)

B. Ecuación de Friedmann-Lemaître: La ecuación que no encontraron ni Einstein ni Hubble

Recordemos que Einstein construyó el primer modelo auto consistente desde el marco de la Relatividad General agregando una constante, la constante cosmológica, para que el universo no se expanda ni se contraiga. Hubble consideraba que las galaxias se mueven en el espacio. Lemaître consideraba que las galaxias “fijas” en el espacio son “arrastradas” por la expansión.

Los diferentes ingredientes del universo están “inscriptos” en la ecuación de Friedmann-Lemaître que permiten determinar la estructura del universo con su contenido.

$$(da/a)^2 + \frac{c^2 k}{a^2} = \left(\frac{8}{3}\right) \pi G \rho + \Lambda/3 \tag{6}$$

Nos dice que: la expansión + la curvatura = masa del universo + energía del vacío cuántico.

Desde la mirada de la Relatividad General, las conclusiones sobre el corrimiento al rojo cosmológico son:

- a) El desplazamiento al rojo de un objeto no depende de la longitud de onda en que se observa. Depende de la distancia.
- b) Es lineal con la distancia. La métrica está garantizada con esta propiedad en las galaxias con z no muy grande. Cuando la distancia D es muy grande se observa al universo en un instante de tiempo anterior por lo que el valor de H era diferente al actual. $H(t)$ es uno de los parámetros fundamentales de la Cosmología, mientras que H_o es la constante de Hubble hoy. Por lo tanto no se verifica la linealidad.
- c) La isotropía se manifiesta en que en la distancia a la galaxia, no depende de la dirección en la que se encuentra. La métrica es isotrópica. Es decir, el factor de escala no es diferente para direcciones distintas.
- d) Desde cualquier punto del universo se observa la misma propiedad si la métrica es homogénea. Es decir, si el factor de escala no depende de la posición sino del tiempo.
- e) No existe un sistema de referencia privilegiado dado que es el universo, como un todo, el que se expande. No existe un centro respecto del cual el universo se expanda. No es una explosión.
- f) La expansión se traduce en una variación de las distancias propias en función del tiempo, que se denomina velocidad de recesión, para distinguirla de una velocidad cinemática. Es el resultado de una variación de las distancias comóviles en función del tiempo.
- g) La expansión sugiere un origen definido en el tiempo para el universo.

A continuación se tiene una tabla con datos de diversos cúmulos galácticos, para trabajar desde la interpretación clásica del alejamiento de las galaxias, y desde la interpretación por una comovilidad de las galaxias en un espacio en expansión. Además se muestra el gráfico correspondiente para diferentes valores de H . Hubble había medido un valor de $H = 500$ Km/seg/mpc pero es incompatible de acuerdo al tiempo de vida de las estrellas y la vida en la Tierra.

TABLA I. Distancia y velocidad radial de diversas galaxias.

Galaxia	Virgo	Ursa Major	Corona Borealis	Bootes	Hydra
---------	-------	------------	-----------------	--------	-------

D distancia (MPC)	15	200	290	520	800
V velocidad (Km/s)	1600	15000	24000	40000	60000

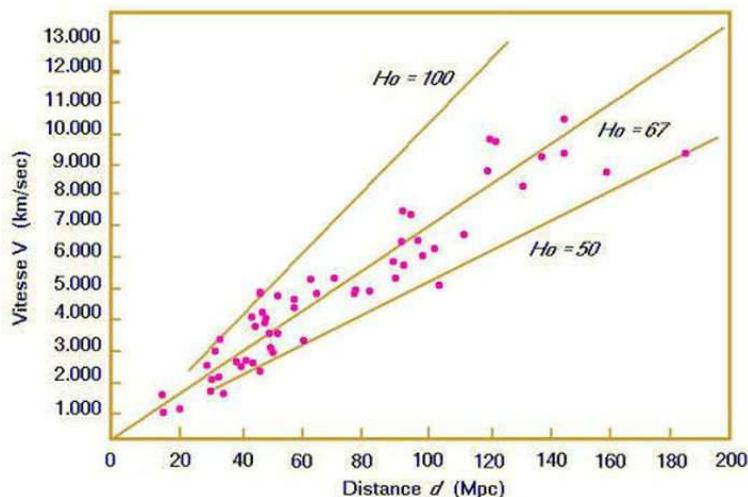


FIGURA 1. La Ley de Hubble para diferentes valores de H.

VII. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta todo lo desarrollado de Hubble a Einstein, pasando por Lemaitre, se visualiza el pasaje de la frontera de un cambio de paradigma en la Física. Las observaciones de Hubble sobre el corrimiento al rojo de los espectros de luz provenientes de las galaxias en espiral, aplicando el principio del efecto Doppler, indicaban que estas se alejaban unas de otras. Si bien esto sugería un universo en expansión, Hubble allí hizo su recorte y dejó que otros contestaran esas hipótesis. En escena entra Albert Einstein con su teoría de la Relatividad General, cuyos cálculos le sugerían un universo en expansión y por lo tanto dinámico. Un conflicto interno provocado por creencias religiosas, lo hace sostener el concepto de universo estático, negando su propia teoría, e introduce un término en sus ecuaciones al que llamó “la constante cosmológica”, que más adelante reconocería como “el peor error de su vida”. A este escenario se suma el sacerdote y científico católico belga George Lemaitre, doctorado en física y matemática, seducido por las ecuaciones relativistas de Einstein, quien llega a la conclusión de un universo en expansión, y va más allá, aportando la idea que el origen del mismo tuvo lugar en un “átomo primigenio”. En 1927 Einstein accede a su trabajo en un encuentro de ciencias, y le dice: “He leído su artículo; sus cálculos son correctos pero su física es abominable”. Pasaron varios años y en 1933 se volvieron a encontrar en el Instituto Tecnológico de California. Einstein reconoce su postura sobre el universo en expansión, pero no el concepto de “átomo primigenio”. Es de destacar que antes de la muerte de Lemaitre, el descubrimiento de la Radiación Cósmica de Fondo por parte de Arno Penzias y Robert Wilson, constituiría la evidencia más certera de la Teoría del Big Bang, lo que confirmaría la hipótesis de Lemaitre, la importancia de la aplicación de las ecuaciones de la Relatividad General de Einstein a la Cosmología y las valiosísimas observaciones que hiciera Edwin Hubble, que puso en crisis el paradigma del universo estático, generando el escenario propicio necesario para llegar al concepto de universo dinámico y en expansión.

Las teorías siempre están en discusión. Están vivas como el Universo. Son una construcción permanente.

REFERENCIAS

Acker, A. et Jaschek C. (1998). *Astronomie: Methodes et calculs. Exercices corrigés*. Paris: Editorial Masson.

Acker, A. (2013). *Astronomie Astrophysique (5e édition)*. Paris: Editorial Dunod.

Barell J. (1999). *El aprendizaje basado en problemas. Un enfoque investigativo*. Editorial Manatíal.

Cepa J. (2007). *Cosmología Física*. Madrid: Editorial Akal.

Ferris T. (1999). *La aventura del universo*. Barcelona: Editorial Drakontos.

Luis G. *La evolución del universo*, <http://particulaselementales1j.blogspot.com.ar/p/la-evolucion-del-universo-noelia.html> 30/06/2014

Luminet, J. P. (2001). *L'Univers chiffonné*. Paris: Librairie Artheme Fayard.

Moreschi O. (2010). *Energía. Colección: Las ciencias naturales y la matemática*. Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Seeds, M. A. (1993): *Horizons exploring the universe*. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.

Villeneuve, S. (2002). *Astronomie et Astrophysique*. Paris: Editorial De Boeck universite.