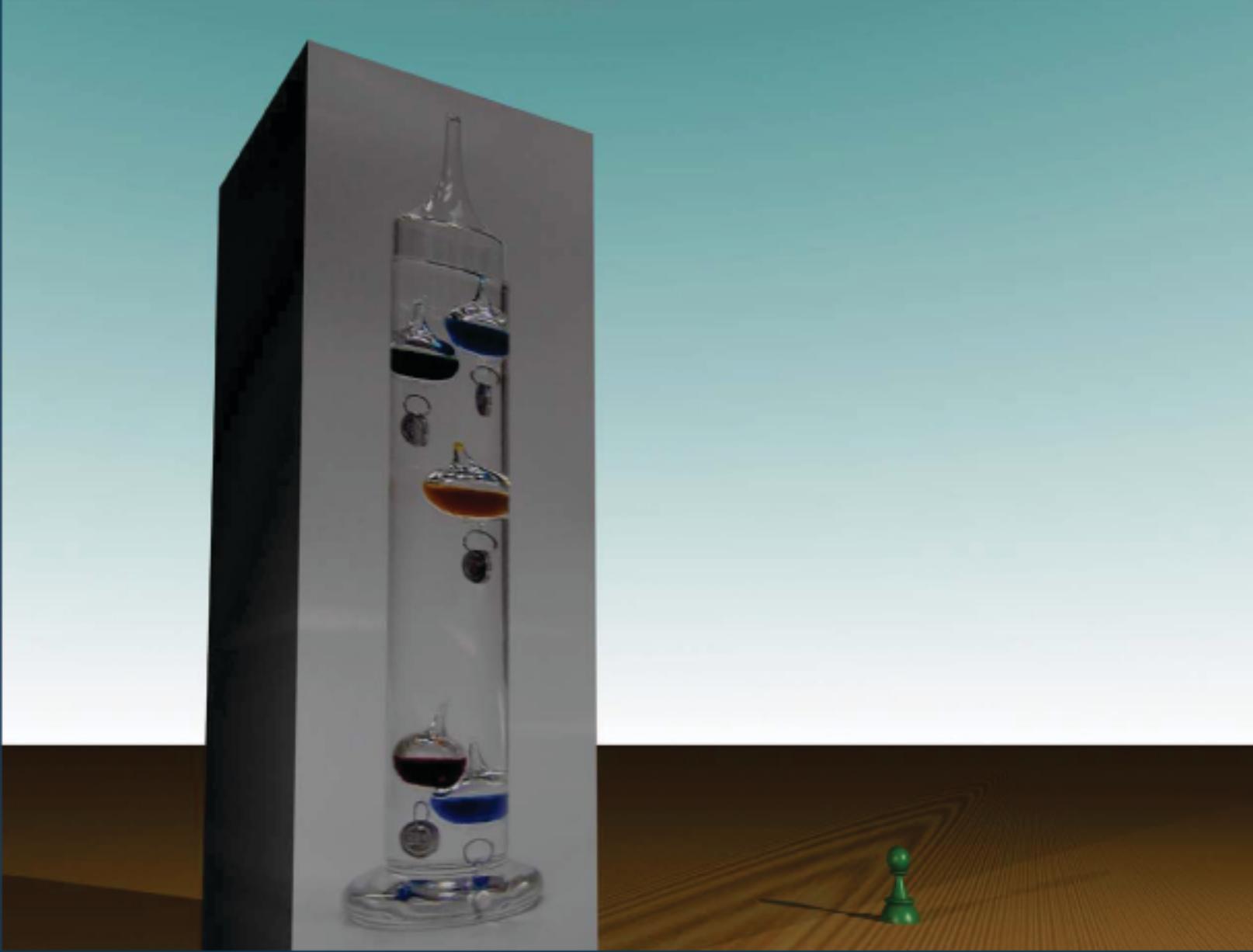


María Luisa Marquina (Coordinadora)

CONOCIMIENTOS FUNDAMENTALES DE

FÍSICA

Conocimientos fundamentales de Física



María Luisa Marquina (Coordinadora)



COLECCIÓN CONOCIMIENTOS FUNDAMENTALES



INTRODUCCIÓN

Tienes en tus manos un libro de Física que los autores pretendemos sea diferente a la mayoría de los que se han escrito hasta ahora en México.

Te presentamos algunas razones por las que pensamos que este libro se distingue de los demás:

Lo escribimos profesores mexicanos de la UNAM para alumnos de bachillerato, como tú. Tiene por ello, ejemplos relacionados con nuestra vida cotidiana.

Te presentamos aquellos conceptos que consideramos fundamentales para el aprendizaje de la Física. Son pocos para que tengas tiempo de estudiarlos y aprenderlos bien.

Tiene muchas ilustraciones, experimentos y videos que te ayudarán a comprender mejor el texto.

Todos los módulos inician con preguntas que creemos son relevantes para ti, y terminan contestándolas.

Harás muchos experimentos sencillos con material que podrás adquirir fácilmente y que deseamos te sirvan en la vida cotidiana; por ejemplo, construirás un motor, un termómetro, sabrás cómo funcionan muchos de los aparatos que usas cotidianamente, y lo más importante; palparás los fenómenos físicos que a veces son difíciles de entender y visualizar.

Y por si lo anterior fuera poco, encontrarás el libro impreso en papel, pero también en formato digital. Esto gracias al apoyo de muchas dependencias de la UNAM dirigidas por el Rector, Dr. Juan Ramón de la Fuente, y coordinadas por la Dra. Rosaura Ruiz, Secretaria de Desarrollo Institucional, que quieren mejorar la educación media superior en nuestro país.

Queremos que este libro te emocione a tal grado que al leerlo, realizar sus experimentos, ver sus videos e ilustraciones, tengas el deseo de aprender más por tu cuenta. Queremos mostrarte que la Física es una ciencia que puede ayudarnos a mejorar la vida en nuestro planeta y que tú puedes dedicarte a ello. Que te des cuenta de que tú, una persona que tiene el privilegio de estar en bachillerato, puedes ser un futuro físico que contribuya a resolver tantos problemas que aquejan a la humanidad. Pero también deseamos que si no decides estudiar una carrera relacionada con esta ciencia, porque tienes otra vocación, de todos modos hayas aprendido y disfrutado del estudio de la Física, que tengas información para que puedas tomar decisiones responsables, y así contribuyas al bienestar de los seres humanos y a mejorar la calidad de vida en nuestro planeta.

¡Qué disfrutes nuestro libro, que ahora es tuyo!
L@s autor@s



Figura 1. Video *La Tierra vista desde la Luna*.

MÓDULO **1**

De lo grande a lo pequeño

Introducción

En nuestro Universo por un lado se encuentra lo infinitamente gigantesco y lejano, como las galaxias y los cuasares, así como los eventos que ocurrieron hace miles de millones de años y que dieron origen al universo, es decir, absolutamente todo lo que nos rodea. En el otro extremo, nos encontramos con lo infinitamente pequeño, como los átomos, las partículas elementales, los cuarks y los fenómenos subatómicos que ocurren en fracciones infinitesimales de segundo.

Entre estos extremos de tamaño, nos encontramos nosotros, los seres humanos, nuestra vida es muy corta si la comparamos con la edad del Universo y gigantesca con respecto a la vida media de algunas partículas elementales; sin embargo, lo más grandioso del ser humano es su ingenio y su capacidad para cuestionarse y tratar de comprender todo lo que nos rodea. Somos capaces de diseñar y construir sofisticados instrumentos que sirven para estudiar tanto lo muy grande como lo muy pequeño; desde el Universo que se expande segundo a segundo, y que incluye todo lo que existe, como las estrellas, las nebulosas, los cuasares, los hoyos negros, y hasta el conjunto de todas las galaxias, incluyendo la que habitamos: la Vía Láctea, a la cual pertenecen el Sol y muchas estrellas, además de los planetas que ya conoces: Mercurio, Venus, Marte,

Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, Plutón,^[*] y desde luego la Tierra, que es el lugar en donde vivimos y donde ocurre la mayoría de los fenómenos físicos que conocemos: ya sean eléctricos, magnéticos, terremotos, rayos, lluvia, viento, calor, frío, nieve, marea y también los espectaculares impactos de meteoritos, tsunamis y erupciones volcánicas como las del Popocatepetl. Así que estamos rodeados de fenómenos físicos; algunos los podemos percibir con nuestros sentidos, mientras que para estudiar otros necesitamos instrumentos especializados, como telescopios, aceleradores de partículas, láseres, microscopios electrónicos y muchos más.

Así como no es fácil ver lo que ocurre en el Universo, tampoco es fácil ver lo que ocurre dentro de nuestro cuerpo; para hacer un viaje hacia el interior de nosotros mismos, tendríamos que hacernos microscópicos; primero, para atravesar nuestra piel, tenemos que hacernos mil veces más pequeños, entonces podríamos ver las células que la constituyen; si nos seguimos achicando, a la décima parte del tamaño anterior, podemos ver las moléculas que forman estas células; y si nos hacemos de un tamaño que es la millonésima parte podremos ver los átomos de estas moléculas. Los átomos que están dentro de ti, así como los átomos de todas las cosas que nos rodean, están en continuo movimiento; los átomos están formados por partículas llamadas electrones y núcleos, e intercambian energía en paquetes; llamados cuantos. ¿Cuántos? ¡Uuy!, pues son muchísimos, y para su estudio se utiliza la mecánica cuántica.

Los núcleos atómicos están compuestos de partículas aún más pequeñas, llamadas protones y neutrones; sin embargo, los científicos que estudian las partículas elementales, han propuesto que existen otros componentes: los llamados quarks que, junto con los leptones, —una clase de partículas a las que pertenece el electrón— constituyen lo verdaderamente elemental.

Esto fue un breve viaje por la física, desde lo inmenso, aquello que nos queda a miles de millones de años luz de distancia, hasta llegar a lo micro; las células y el mundo de las partículas elementales. La Cosmología es una especialidad de la física, con gran auge que han unido a los dos extremos de la escala. Los hombres y mujeres que la estudian tratan de comprender el origen y la evolución del Universo con base en observables astronómicas, y como todas las áreas de la física, se apoya en los conocimientos que se han obtenido mediante muchos experimentos y observaciones realizados por los hombres a través de la historia. El ser humano es, así, constructor y testigo único de tan maravillosa ciencia. Alguna vez te has preguntado...

¿Cómo se formó el Universo?

¿De qué están hechas las cosas?

1-1 Desde la Gran Explosión

1.1.1. El Gran Mito

*El Cosmos es:
Todo lo que es,
Todo lo que fue,
Todo lo que será.*

El solo hecho de pensar en el Universo, sus galaxias y sus estrellas, hace que nuestros sentidos se agudicen. Pensar y hablar del Cosmos asemeja nuestro ingreso al más grande valle de misterios en donde la ciencia y la fantasía se confunden.

Muchas leyendas se han desarrollado acerca de lo que vemos en el cielo noche tras noche. Así, han surgido las constelaciones; imágenes que cada cultura ha colocado en el cielo para expresar sus emociones, deseos y necesidades; el nombre de la Vía Láctea surge de la leyenda donde la diosa Era deja una marca de leche en el cielo al descubrir a Hércules prendido de su seno, hijo bastardo de su esposo Zeus.

^[*] Durante el proceso de edición de este libro, Plutón pasó a ser considerado *planeta enano*.

Durante los últimos 100 años hemos visto el nacimiento y desarrollo del más importante mito surgido de la ciencia moderna: la *expansión cósmica*.

Se dice que alguna vez todo el Universo estuvo concentrado en un solo punto, una especie de huevo primordial que, por alguna razón, estalló. Hoy, de aquella *gran explosión*, sólo vemos su proceso expansivo.

Mayor alarde de imaginación es imposible. Estamos concibiendo a todo el Cosmos, con sus estrellas, nebulosas y galaxias, como el gran protagonista de un evento, el más grande, el más espectacular. Sin embargo, si nos detenemos un momento a reflexionar, tal vez debiéramos preguntarnos:

¿Cómo podemos llegar a afirmar que el Universo, como un todo, se mueve de alguna forma?

¿Cómo establecemos que ese movimiento no es cualquiera, sino expansivo?

Sólo cuando se pueda asegurar que conocemos la evidencia y la forma en que se interpreta, podremos asegurar que el *Big Bang* no es un mito, sino un hecho.

1.1.2. Un Brillo Variable

A comienzos del siglo xx, bajo la dirección de Edward C. Pickering (1846-1919), el observatorio del Harvard College se ocupaba de detalladas observaciones estelares. Para realizar el tedioso trabajo de ver miles de fotografías, comparar brillos, hacer gráficas y cálculos, Pickering contrató a mujeres del lugar, dispuestas a trabajar por menos dinero y, en su opinión, temperamentalmente más adaptadas para ese tipo de labor. A pesar de sus contribuciones, aquellas observadoras prácticamente no fueron reconocidas por la comunidad astronómica de su tiempo. Tal vez por eso destaca más la obra de una de ellas: Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), quien habría de establecer un método revolucionario para la medición de grandes distancias. Hija de un ministro congregacional, sorda, de modales reservados y notablemente brillante, Leavitt llegó a ser jefa del departamento especializado en medir el brillo estelar, según quedaba registrado en las fotografías. Su trabajo se centró en las placas, obtenidas durante varios años por un telescopio de 60 cm que el observatorio de Harvard tenía en las montañas del Perú, que mostraban un enjambre estelar muy conocido por los observadores del hemisferio sur: la Pequeña Nube de Magallanes.

Leavitt se encontró con numerosos casos de estrellas de brillo variable, pero cíclico. En virtud de que la primera de estas curiosas luciérnagas fue la estrella Delta, en la constelación de Cefeo, se les conoce como estrellas variables *cefeidas*.

Por razones aún no completamente entendidas, las cefeidas se expanden y contraen con regularidad; como consecuencia, brillan intensamente, luego se apagan y después vuelven a brillar repitiendo el ciclo. El lapso de tiempo en que se repite este

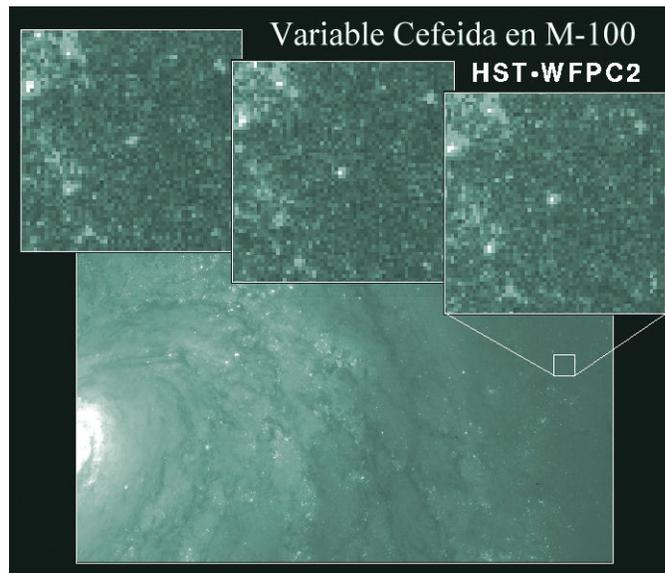


Figura 2. Variable Cefeida en M-100.

ciclo, es decir, el periodo de una variable cefeida puede ser tan corto como un día o tan largo como varios meses. Sea cual sea el ritmo, por lo general la periodicidad tiene una sorprendente precisión de hasta uno o dos minutos.

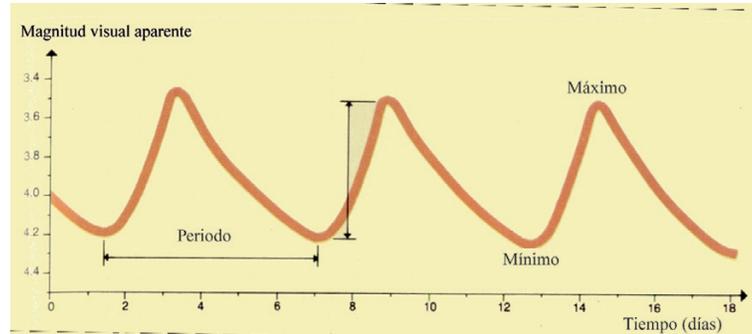


Figura 3. Magnitud visual aparente vs. tiempo.

En 1908 Leavitt había compilado una lista de más de un millar de dichas variables en la Pequeña Nube de Magallanes.^[1] Dieciséis de ellas aparecían en suficientes fotografías como para determinar sus periodos. De su detallado estudio empezó a surgir una curiosa característica: *Mientras más largo es su periodo, mayor es su brillo máximo.*

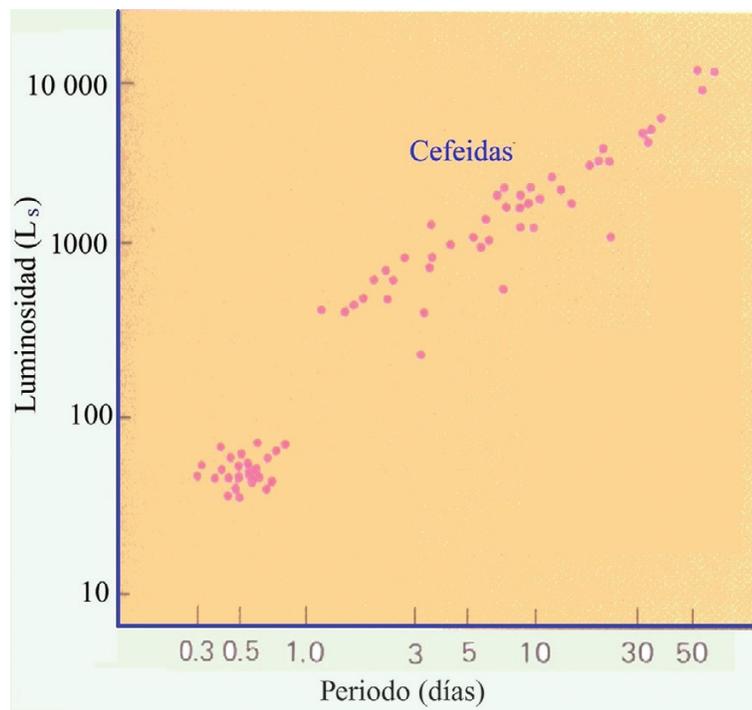


Figura 4. Luminosidad vs. periodo.

^[1] Henrietta S. Leavitt, "1777 variables en las nubes de Magallanes". *Annals of Harvard College Observatory*, vol. 60, pp. 87-108.3. 1908.

En 1912, cuando ya había ampliado su estudio a 25 cefeidas, publicó un artículo en el que mostraba que el brillo y el periodo están ligados matemáticamente. Más aún, que todas las cefeidas entran en una sola escala. Puesto que estas estrellas variables se hallan, probablemente, a casi la misma distancia de la Tierra, sus periodos están aparentemente asociados a su emisión real de luz.^[2]

El resultado fue impactante; Henrietta Leavitt había encontrado la manera de conocer el brillo intrínseco de una estrella. De aquí, el brillo aparente, que es el que observamos desde la Tierra, nos permite establecer la distancia a la que se encuentra.

1.1.3. Grandes Distancias

Si la magnitud absoluta del brillo de una cefeida cercana podía medirse, comparándola con las más lejanas de igual periodo, la diferencia entre las magnitudes de brillo absoluto y aparente nos daría las distancias con sólo considerar que éste disminuye con el inverso del cuadrado de la distancia a la que se encuentre.

Henrietta Leavitt no pudo concluir su obra porque Edward Pickering, su jefe en el observatorio, le asignó otras tareas; él creía que el trabajo del observatorio era recoger datos y no perseguir significados cósmicos.

En esa misma época, 1917, existía el debate acerca de la identidad de las nebulosas espirales y no se lograban resultados convincentes. Sin embargo, los fotógrafos de las espirales empezaron a notar la existencia de objetos cercanos a ellas que incrementaban notablemente su brillo. Se pensaba que esto se debía a que muchas estrellas sufrían una erupción de materia multiplicando su brillo. Este comportamiento se traduce en que estrellas con poco brillo, de repente se muestran más brillantes que sus vecinas, dando la impresión de ser una estrella nueva. Esto dio origen a su nombre latino: *nova*.



Figura 5. Supernova cerca del núcleo de la Galaxia M-51.

^[2] Henrietta S. Leavitt, y Edward C. Pickering. "Periodos de 25 estrellas variables en la pequeña Nube de Magallanes". *Harvard College Observatory Circular*, vol. 173, pp. 1-3. Marzo de 1912.

Parecería razonable que, accidentalmente, alguna nova pudiera estar ubicada en la línea de observación de una nebulosa espiral; pero que hubiera varias, forzó otro tipo de preguntas.

¿Es posible que estas novas formen parte de la espiral?

Más aún...

¿Acaso aquellas masas, las nebulosas espirales que son invisibles para los más poderosos telescopios, son un conglomerado de estrellas?

Este razonamiento resultó relevante. Si las nebulosas espirales son del mismo tipo que las observadas en nuestro agrupamiento estelar, el brillo promedio de aquellas novas, decenas de miles de veces más débiles, indica que están un centenar de veces más lejos. Algunos astrónomos empezaron a calcular las distancias que surgían de esta hipótesis.

Los resultados indicaban que las nebulosas espirales estaban mucho más alejadas de la Vía Láctea, incluso para el tamaño más grande aceptado para nuestra galaxia.



Figura 6. Vía Láctea.

Para gente como Harlow Shapley (1885-1972) estas observaciones eran pruebas inequívocas de que las espirales son galaxias independientes, universos isla. Sin embargo, cuando formuló su teoría *La Gran Galaxia*, cambió de opinión. La Vía Láctea, tal como la imaginaba, era demasiado grande para que todas las espirales fueran comparables. Dado el caso, las espirales debían estar mucho más lejos de lo que indicaban las novas.

1.1.4. Grandes Velocidades

Desde 1912, en el observatorio Lowell de Flagstaff, Arizona, un espectroscopista hábil y paciente, Vesto Slipher (1875-1969), había logrado acumular suficiente luz de una galaxia espiral de la constelación de Andrómeda, midió su desplazamiento Doppler (véase el anexo A.1.1.1.) y, usando los cálculos de Fizeau, determinó sus velocidades (véase el anexo A.1.1.2.). El resultado fue impactante: la nebulosa de Andrómeda se está acercando a la Tierra a una velocidad de 300 km/s.^[3] Esta era la velocidad más grande jamás medida para algún objeto celeste.

^[3] V. M. Slipher, "La velocidad radial de la nebulosa de Andrómeda". *Lowell Observatory Bulletin* núm. 58, vol. II, pp. 56-57. 1913.

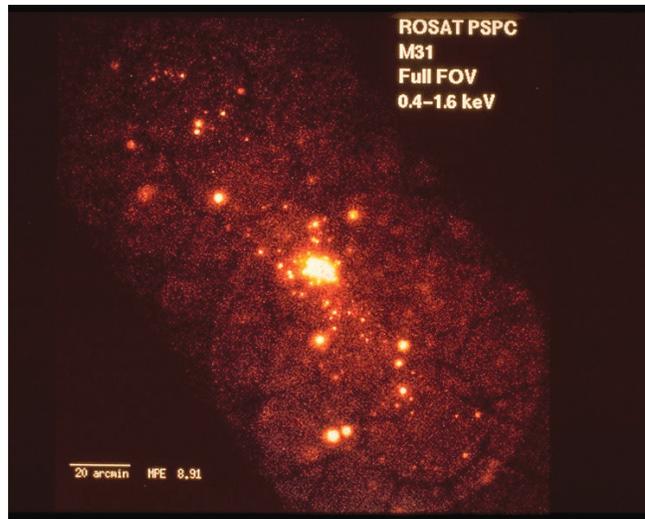


Figura 7. Nebulosa espiral.

Para 1914, Slipher había determinado la velocidad, según la línea de observación, de 15 nebulosas espirales. Para sorpresa de todo el mundo, 13 de ellas se están alejando, algunas a casi 800 km/s, más del doble que la velocidad de aproximación de Andrómeda. Para Heber Doust Curtis (1872-1942), descubridor de las novas, y otros astrónomos, aquel era un poderoso argumento a favor del universo isla. Las velocidades de las espirales son demasiado grandes para estar ligadas gravitacionalmente a la Vía Láctea.

1.1.5. ¡Es Variable!

Edwin Hubble (1889-1953) nació en Missouri. Justo cuando estaba terminando el doctorado, Hale estaba preparándose para contratar al personal que habría de operar el telescopio de 2.5 m que pronto se concluiría en Monte Wilson, en las montañas de San Gabriel, en California, e invitó a Hubble para que fuera uno de los que lo usaran; pero era 1917 y comenzaba la primera Guerra Mundial, como respuesta recibió un telegrama que decía: “Lamento no poder aceptar su invitación. Marcho a la guerra.”



Figura 8. Nebulosa M-51.

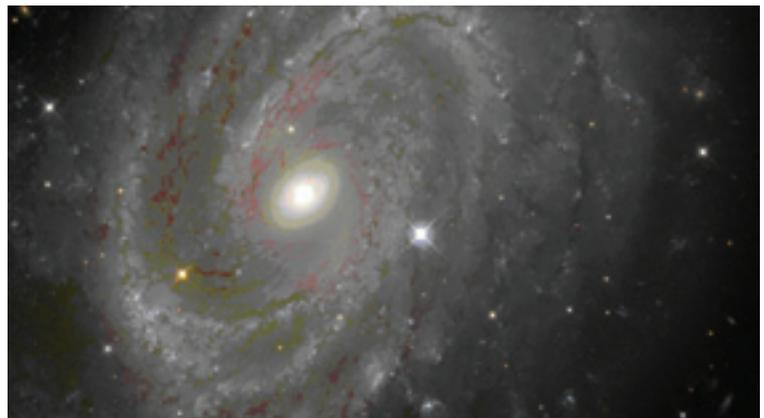


Figura 9. Nebulosa espiral.

Hubble se alistó en el ejército y fue enviado a Francia. Cuando regresó, en 1919, la invitación seguía en pie y aceptó. Empezó con algunos trabajos para clasificar nebulosas; esto incluía lo que siempre fue su pasión: las nebulosas espirales. Hubble creía en la teoría del universo isla y esperaba que el enorme telescopio de 2.5 m de Monte Wilson le ayudara a validarla. Pero ni siquiera este poderoso instrumento podía capturar inequívocamente estrellas individuales en las fotografías de las espirales. En algún momento Hubble creyó ver estrellas, pero sus colegas se mostraron escépticos. De cualquier forma, ver estrellas no resolvía nada si no se podía determinar la distancia a las espirales.

Sin embargo, las fotografías de las espirales ya eran suficientemente nítidas como para mostrar los puntos de luz que Curtis había identificado como novas, y Hubble centró su atención en ellas. Un día de 1923, cuando trabajaba con varias fotografías de Andrómeda, reexaminó un punto de luz al que había marcado con *N* para identificarla como nova. Revisó placas anteriores, encontrando que el cambio de brillo era periódico. Eufórico, tachó la *N* y puso: *variable!*

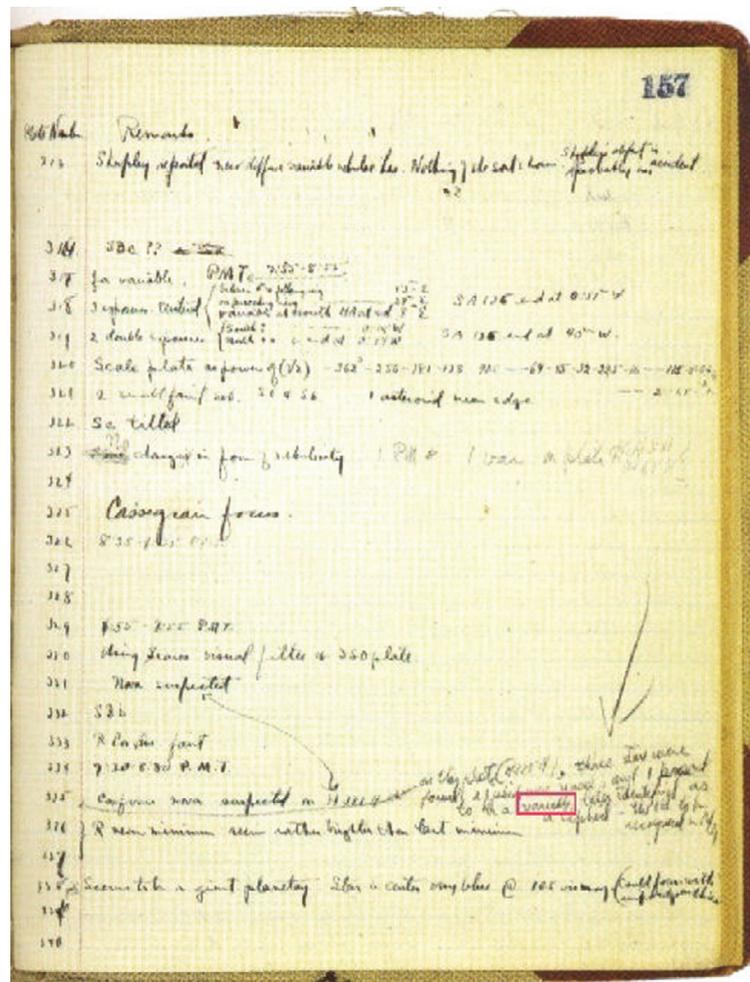


Figura 10. Nota original de Hubble.

La hasta entonces nova se comportaba exactamente como una variable cefeida. Finalmente, Hubble tenía una forma para determinar la distancia a la nebulosa de Andrómeda. La cefeida en la espiral era muy débil, mucho más que las que Shapley

había descubierto en los cúmulos globulares. Usando la calibración de Shapley, Hubble obtuvo que la nebulosa de Andrómeda, la M-31 en los catálogos, estaba a 900 mil años luz de distancia, mucho más allá de la Vía Láctea. La conclusión entonces fue contundente:

Andrómeda es una galaxia independiente, completamente desarrollada.

Siempre muy cauteloso para publicar sus descubrimientos, Hubble no se apresuró a enviar su artículo. Todavía tenía dudas. Después de todo, la relación del periodo con la luminosidad todavía era muy controvertida como indicador de distancias. En uno de sus últimos trabajos, Edwin Hubble escribió:

“Con el incremento de las distancias nuestro conocimiento se desvanece, y se desvanece rápidamente hasta que en el último e impreciso horizonte buscamos, entre fantasmales errores de observaciones, puntos de referencia que apenas son más sustanciales. La búsqueda continuará. El ansia es más antigua que la historia. Nunca resulta satisfecha, y nunca podrá ser suprimida.”

1.1.6. Recesión Galáctica

Siguiendo los pasos de Slipher y Hubble, el astrónomo estadounidense Milton Lasell Humason (1891-1972) retomó el trabajo sobre las velocidades radiales de las galaxias. Con sumo cuidado comenzó a tomar fotografías que necesitaban días enteros de exposición para registrar los espectros de galaxias cada vez más tenues. Entre las galaxias más débiles descubrió velocidades que hacían palidecer a las captadas con anterioridad.

En 1928, Humason midió la velocidad radial de la galaxia NGC 7619, obteniendo 3800 km/s.^[4] Hacia 1936 estaba midiendo velocidades de 40 mil km/s, más de un octavo de la velocidad de la luz. Y siempre se trataba de movimientos de alejamiento.^[5]

Las velocidades que se estaban midiendo eran tan grandes que los astrónomos empezaron a poner en tela de juicio la interpretación Doppler del corrimiento al rojo.

Un corrimiento hacia el rojo, ¿implica necesariamente que la fuente se está alejando?, o ¿existe alguna explicación alternativa que evite tener que aceptar velocidades tan grandes?

¿Tal vez la luz de las galaxias lejanas se ven enrojecidas, en su larga travesía, por el polvo fino del espacio intergaláctico?

Hubo quien propuso que, en ocasiones, por su interacción con el polvo, la luz viene perdiendo energía. Dicha pérdida se traduce en un alargamiento de la longitud de onda. El espectro se habrá enrojecido. Así, el corrimiento al rojo no se debería a gigantescas velocidades de recesión de las galaxias, sino a que estamos recibiendo su luz “cansada”.

Sin embargo, en algunas galaxias la desviación medida puede ser hacia el azul; ¿Esto significa que la luz gana energía en su viaje? Algo así como ¿luz “fortalecida”? Esto es, si se cansa mucho en algunos recorridos, se fortalece en otros.

En resumen, la interpretación más aceptada del corrimiento al rojo es que las galaxias se alejan de nosotros a velocidades gigantescas y algunas, muy pocas, se acercan. A este fenómeno de alejamiento se le llama *recesión galáctica*.

Hubble siguió trabajando, paralelamente a Humason. Había logrado, con un gran esfuerzo y usando distintos procedimientos, estimar la distancia a las galaxias. En 1929,

^[4] M. L. Humason. “¿Está el Universo expandiéndose?”. *Astronomical Society of the Pacific Leaflets*, vol. 2, p. 161. 1936.

^[5] M. L. Humason. “Núm. 531, La velocidad radial aparente de 100 nebulosas extragalácticas”. *Contributions from the Mount Wilson Observatory/Carnegie Institution of Washington*, vol. 531, pp. 1-13. 1936.

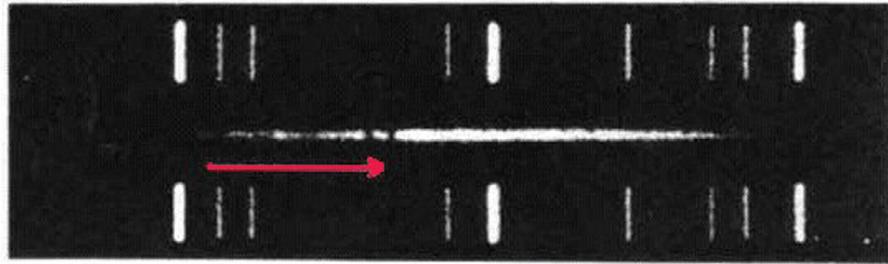


Figura 11. Corrimiento hacia el rojo.

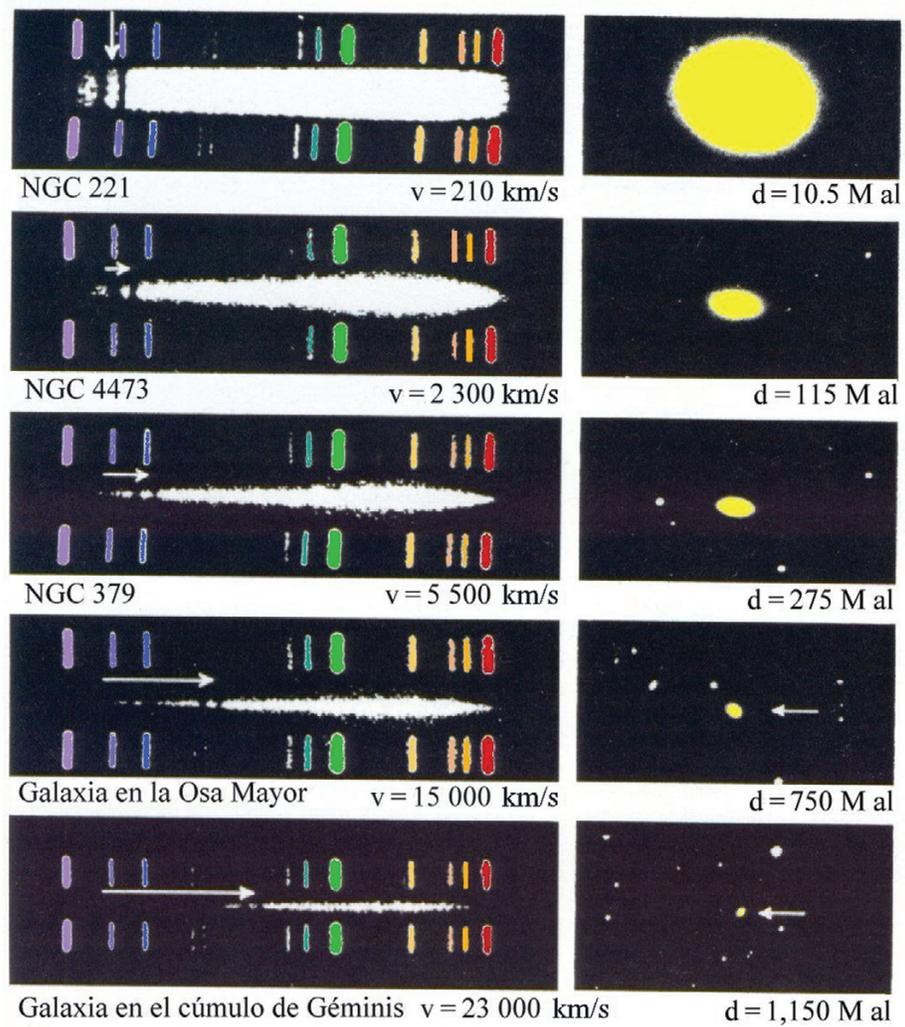


Figura 12. Corrimiento hacia el rojo de diferentes Galaxias.