

# LA ESTRUCTURA DEL UNIVERSO A GRAN ESCALA

CARLOS TEJERO PRIETO

Texto íntegro de las píldoras insertadas en los dos programas de EUREKA dedicados a la “Estructura del Universo a gran escala” en los que entrevistamos al Profesor Fernando Atrio Barandela, Catedrático del área de Física Teórica de la Universidad de Salamanca.

## 1. LA ASTRONOMÍA GRIEGA: DE HIPARCO A PTOLOMEO

Hiparco de Nicea, que vivió entre el 190 y el 120 a. C., fue un astrónomo, geógrafo y matemático griego que vivió la mayor parte de su vida en la isla de Rodas. Es el primer gran astrónomo observational de la Historia. Entre sus aportaciones cabe destacar:

- el primer catálogo astronómico que contenía las posiciones de 1080 estrellas; clasificándolas además en magnitudes, según su grado de brillo.
- la medida de las posiciones de los cinco planetas: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno
- el descubrimiento de la precesión de los equinoccios

Claudio Ptolomeo, vivió aproximadamente entre los años 100 y 170 d. C en el Egipto helenizado. Se cree que trabajó en la famosa Biblioteca de Alejandría como astrólogo y astrónomo, actividades que en esa época estaban íntimamente ligadas. Aunque no se conocen muchos detalles sobre su vida, sus trabajos científicos son bien conocidos debido a que su obra principal sobrevivió gracias a que se tradujo al árabe en el siglo V y la conocemos como “el Almagesto”, que en árabe significa “el más Grande”. Su principal contribución consistió en dar una descripción cuantitativa de la cosmología geocéntrica de Aristóteles. Para ello, hizo uso de las medidas de Hiparco, suplementadas por otras nuevas realizadas por él mismo. Su modelo geocéntrico se usó durante 14 siglos para predecir las posiciones del Sol, la Luna, planetas y estrellas con una precisión de 1° que es la precisión de las observaciones de Hiparco.

## 2. LA ASTRONOMÍA DEL RENACIMIENTO: COPÉRNICO Y TYCHO

Nicolás Copérnico, nació en Torun (Polonia) en 1473. En 1543, poco tiempo después de su fallecimiento, apareció su libro: De revolutionibus orbium coelestium (Sobre las revoluciones de las esferas celestes) que marca el comienzo de la Astronomía moderna con la introducción del modelo heliocéntrico. Para sus cálculos, Copérnico usó las observaciones hechas por Hiparco, juntas con las suplementarias de Ptolomeo y las mejoras introducidas por los astrónomos árabes, ya que después de 17 siglos todavía seguían siendo las mejores observaciones disponibles.

Sin embargo, esto cambió poco tiempo después con Tycho Brahe, un noble danés nacido en 1546. En 1576 inició un período de observaciones de 25 años con la intención

de comprobar la validez del modelo heliocéntrico de Copérnico. Primero desde el castillo de Uraniborg en Dinamarca y después desde el castillo de Benatek cerca de Praga, midió las posiciones de las estrellas y planetas con una precisión sin precedentes, un minuto de arco, unas 50 veces mejor que la alcanzada por Hiparco. Esto convirtió a Tycho Brahe en el mejor astrónomo observational de su época y en el más grande desde Hiparco, después de 17 siglos.

### 3. LA ASTRONOMÍA DEL BARROCO: KEPLER, GALILEO Y NEWTON

El caudal de datos astronómicos obtenidos por Tycho Brahe fue muy útil para precisar el modelo heliocéntrico de Copérnico solventando algunas discrepancias que se habían observado.

Johannes Kepler, nació cerca de Württemberg (Alemania) en 1571. En 1597 comenzó a escribirse con Tycho Brahe y en 1599 se convirtió en el asistente de éste en su nuevo observatorio del castillo de Benatek cerca de Praga. En 1601, tras la muerte de Tycho, Kepler pasa a ser su sucesor y puede por fin acceder a los datos de las observaciones hechas por Tycho a lo largo de su carrera. Después de 8 años de laboriosos cálculos usando los datos de Tycho, pudo enunciar sus dos primeras leyes en su libro *Astronomia Nova* publicado en 1609:

**Primera Ley de Kepler:** Cada planeta se mueve en una elipse, con el Sol situado en uno de sus focos.

**Segunda Ley de Kepler:** El radio que une un planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.

Después de otros 9 años de intenso trabajo, obtuvo la

**Tercera Ley de Kepler:** El cuadrado del tiempo que un planeta tarda en dar una vuelta alrededor del Sol es directamente proporcional al cubo de su distancia al Sol.

Aunque descubrió estas reglas, relativamente simples, para el movimiento planetario, Kepler murió en 1630 sin haber comprendido su sentido último.

Un contemporáneo suyo, Galileo Galilei, nacido en Pisa en 1564, dió comienzo a la Astronomía observational moderna. En 1609, precisamente el mismo año de la publicación de la *Astronomia Nova* de Kepler, tras tener noticias por un antiguo alumno suyo de que en Holanda se había construido un telescopio que permitía ver los objetos lejanos, Galileo construye su primer telescopio e inmediatamente lo aplica al estudio de los objetos celestes, estableciendo así un hito en Astronomía que revolucionaría nuestro conocimiento del Universo. En 1610 a lo largo de pocas semanas de observación hizo una serie increíble de descubrimientos: cráteres y montañas en la Luna, la naturaleza de la Vía Láctea compuesta por innumerables estrellas, las fases de Venus, Saturno y sus “extraños apéndices” o asas, planeta orejudo lo denominó, que su telescopio no permitía resolver como anillos, Júpiter y sus lunas mayores que hoy conocemos como Ío, Europa, Calixto y Ganímedes, haciendo el descubrimiento fundamental de que giraban en torno a Júpiter formando un mini sistema solar; considerando esto una prueba del sistema heliocéntrico.

Tras la muerte de Galileo en 1642, nace en 1643 Isaac Newton en Woolsthorpe (Inglaterra), uno de los mayores genios de toda la Historia. En 1687 escribió el libro

Philosophiae naturalis principia mathematica (Principios matemáticos de la filosofía natural), que es uno de los libros científicos más importantes de todos los tiempos. En él se recogen las leyes del movimiento, su teoría de la Gravedad y la ley de la Gravitación Universal, ofreciendo una explicación natural de las leyes de Kepler como consecuencia de la atracción gravitacional que sufren los planetas y el Sol. Además inventó el telescopio reflector que al no tener aberración cromática permitió hacer mejores observaciones. A partir de entonces el desarrollo de los telescopios ha correspondido prácticamente a los reflectores que permite mayores tamaños y, por tanto, mayores aumentos de modo que podemos ver objetos más lejanos.

#### 4. LA ASTRONOMÍA DE LA ILUSTRACIÓN

En 1711 nace el astrónomo inglés Thomas Wright, siendo el primero que especuló correctamente basado en las observaciones astronómicas, en su obra: An original theory or new hypothesis of the Universe (1750) (Una teoría original o nueva hipótesis sobre el Universo), que la Vía Láctea podría ser un objeto en rotación compuesto por un gran número de estrellas que se mantienen unidas por la fuerza de la gravedad, de modo similar a lo que ocurre en el sistema solar pero a una escala muchísimo mayor. Así mismo especuló que las nebulosas lejanas eran independientes de la Vía Láctea pero semejantes en su estructura. En 1755, el filósofo Immanuel Kant desarrolló en su tratado Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels (Historia Natural Universal y Teoría de los Cielos) las ideas de Wright, introduciendo el término “Universo isla” para referirse a cada nebulosa lejana, dando así lugar a la teoría de los “Universos isla”. En 1773 el astrónomo francés Charles Messier que estaba interesado en el descubrimiento de cometas, publicó su catálogo de 110 objetos estelares difusos que permanecen fijos frente al fondo de estrellas, denominados objetos de cielo profundo, para que los astrónomos pudieran distinguirlos de los verdaderos cometas. El astrónomo inglés, de origen alemán, William Herschel comenzó a estudiar el catálogo Messier en 1782, lo que estimuló su interés por los objetos de cielo profundo. En 1786 publicó un catálogo que contenía 1000 nuevos objetos de cielo profundo. De modo simultáneo, Herschel inició en 1782 un proyecto para describir, a partir de las observaciones astronómicas, la forma de la Vía Láctea y la posición del Sol dentro de ella. Basándose en el recuento de estrellas en las distintas zonas del cielo, obtuvo una representación de la Vía Láctea en la que el Sol estaba cercano al centro.

#### 5. HENRIETTA SWAN LEAVITT

La astrónoma norteamericana Henrietta Swan Leavitt, nacida en 1868, tras graduarse en el Radcliffe College de Boston en 1892, ingresó al año siguiente en el Observatorio Astronómico de la Universidad de Harvard como una de las mujeres calculadora contratadas por el director del observatorio, cuya labor consistía en medir y catalogar el brillo de las estrellas a medida que aparecían en las placas fotográficas que generaba el observatorio, debiendo realizar para ello multitud de cálculos rutinarios y pesados; de ahí el nombre de mujeres calculadora. A Henrietta le fue asignado el estudio de las estrellas variables, analizando miles de ellas en las Nubes de Magallanes. In 1908 publicó el artículo “1777 variables in the Magellanic clouds” (1777 variables en la Nubes de Magallanes) en la revista Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College, descubriendo que unas pocas de ellas mostraban una pauta: las más brillantes tenían períodos más largos. Después de un estudio más profundo, en 1912 confirmó que las

variables Cefeidas con mayor luminosidad intrínseca tenían, en efecto, períodos más largos, estableciendo la Ley de Leavitt y marcando con ello un hito de la Ciencia al descubrir así la primera candela estándar en Astronomía, que serviría posteriormente para determinar las distancias de las galaxias más lejanas en las que el método del paralaje no puede usarse. Un año después, Ejnar Hertzsprung determinó la distancia de varias Cefeidas de la Vía Láctea, de modo que la distancia de cualquier Cefeida se podía obtener a partir de la Ley de Leavitt. Por su trabajo, Henrietta Leavitt sólo cobraba 10.50 dólares semanales. Murió en 1921 casi olvidada por la comunidad científica. El matemático Gösta Mittag-Leffler de la Academia de Ciencias de Suecia quiso nominarla para el premio Nobel en 1924, descubriendo que había muerto de cancer tres años antes y, como se sabe, desgraciadamente el premio Nobel no se concede póstumamente. Sin embargo, su descubrimiento cambiaría para siempre nuestra imagen del Universo ya que permitió a Harlow Shapley mover el Sol del centro de la Galaxia y a Edwin Hubble mover la Vía Láctea del centro del Universo.

## 6. LA ASTRONOMÍA A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

Mediante un refinamiento de los métodos de Herschel, el astrónomo holandés Jacobus Kapteyn presentó en 1922 un modelo en el que la Vía Láctea tenía forma lenticular con un diámetro de unos 49000 años luz, con el Sol situado a unos 2000 años luz del centro. En 1927, Harlow Shapley (1885-1972), siguiendo un método basado en la catalogación de los cúmulos globulares, propuso una descripción radicalmente diferente, en la que la Vía Láctea sería un disco plano con un diámetro de unos 300.000 años luz, un espesor de unos 30.000 años luz y el Sol estaría a unos 65.000 años luz del centro. Ambos modelos eran incorrectos al no haber tenido en cuenta los efectos del polvo interestelar en el plano galáctico. La imagen que actualmente tenemos de la Vía Láctea: 100.000 años luz de diámetro, con el Sol situado a 30.000 años luz del centro, surgió en 1930 cuando Robert Julius Trumpler logró cuantificar los efectos del polvo interestelar mediante el estudio de los cúmulos abiertos.

Las evidencias observacionales definitivas que permitieron establecer que las nebulosas espirales eran sistemas estelares independientes de la Vía Láctea se obtuvieron a partir de 1912, cuando Vesto Slipher (1875-1969) comprobó el corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales de 40 nebulosas espirales. Basándose en estos y otros resultados, Heber Curtis (1872-1942) criticó el modelo de Universo de galaxia única defendido por Shapley, afirmando que el tamaño de la Vía Láctea había sido grandemente sobreestimado. Esta controversia dio lugar al Gran Debate que se sostuvo en la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos el 26 de abril de 1926, teniendo a Shapley como defensor del Universo de galaxia única y a Curtis del Universo multigaláctico o Universo isla. El debate quedó sin vencedor, llegándose a la conclusión de que se necesitaban más observaciones para poder decidirlo.

En 1924, Edwin Hubble (1889-1953), astrónomo del observatorio del Monte Wilson, comenzó a obtener las distancias de las nebulosas espirales mediante análisis fotográficos de la nebulosa irregular de Barnard en la constelación de Sagitario, junto con las dos grandes nebulosas espirales de Andrómeda y el Triángulo. Con el nuevo telescopio reflector de 2.5 metros, pudo obtener fotografías que resolvían la parte exterior de estas nebulosas, identificando varias estrellas variables Cefeidas, cuya distancia obtuvo a partir de la relación entre luminosidad y período de dichas estrellas descubierta en 1912 por Henrietta Swan Leavitt. Así, Hubble estimó la distancia de la nebulosa de

Andrómeda en 900.000 años luz, que aún pequeña frente a los 2.4 millones de años luz que aceptamos hoy en día, era lo suficientemente grande para ser incompatible con el modelo de Shapley, de modo que a partir de ese momento se aceptó el modelo multigaláctico de universos islas propuesto por Thomas Wright e Immanuel Kant en el siglo XVIII, zanjando con ello el Gran Debate en favor de las tesis de Curtis. Hoy en día sabemos que la Vía Láctea es una galaxia de estrellas como el resto de millones de galaxias que pueblan el Universo.

## 7. EL SUPUESTO MAYOR ERROR DE EINSTEIN

Einstein, tras enterarse que Hubble había descubierto que el Universo se expandía, supuestamente declaró que “el mayor error de su vida” era haber introducido en 1917 la constante cosmológica en sus ecuaciones de la Relatividad. Esta frase se le atribuye en miles de libros y artículos de diversas disciplinas. Sin embargo, el problema es que puede ser que Einstein nunca la pronunciara. El reconocido astrofísico y escritor Mario Livio sostiene que no ha sido capaz de encontrar ninguna documentación que pruebe de modo fehaciente que Einstein pronunció dicha frase. Pero sí ha sido capaz de demostrar que el origen de la atribución se debe a George Gamow, que lo menciona en un artículo publicado en Investigación y Ciencia en 1956 y en su biografía aparecida póstumamente en 1970.

En su libro “Equivocaciones Brillantes”, Livio explica las razones que restan credibilidad a dicha fuente. Por una parte se sabe que Gamow tenía una cierta reputación de charlatán y bromista. Mientras que por otra, le gustaba fanfarronear, presumiendo de sus relaciones con otros científicos. Este parece haber sido el caso con Einstein, afirmando en su biografía que eran bastante íntimos, cuando en realidad Livio ha encontrado indicios serios que mostrarían que sólo tuvieron una relación más bien formal e infrecuente.

Esto no significa que Einstein estuviera cómodo con la introducción de la constante cosmológica. Obviamente, lo lamentaba y escribió a varios de sus amigos al respecto. Pero de ahí a decir que era el mayor de sus errores, hay una gran trecho. De hecho, cuando escribió al respecto, lo hizo de modo desapasionado y reconfortado por el hecho de que la Ciencia derribara alguno de sus trabajos. En un artículo de 1932 con Willem de Sitter, escribió:

“Históricamente la constante cosmológica se introdujo en las ecuaciones de la Relatividad General para permitir tener en cuenta la existencia de una densidad de masa finita en un Universo estático. Ahora parece ser que en el caso dinámico este objetivo puede ser alcanzado por otros medios que no requieren la introducción de dicha constante.”

Sin embargo, un remordimiento que sí acompañó a Einstein toda su vida, no tiene nada que ver con la elegancia de sus cálculos. El premio Nobel Linus Pauling, tras visitarlo en 1954, dejó escrito en su diario: “Me dijo que había cometido un gran error al firmar la carta dirigida al presidente Roosevelt recomendando la construcción de la bomba atómica; pero que había algo de justificación – el peligro de que los alemanes la construyeran primero.”

## 8. EL GRUPO LOCAL, EL SUPERCÚMULO DE VIRGO Y EL GRAN ATRACTOR

El Grupo Local es el cúmulo de galaxias en el que se encuentra la Vía Láctea. Está dominado por tres galaxias espirales gigantes: Andrómeda, la Vía Láctea y la Galaxia

del Triángulo. El resto de galaxias, otras 42, son más pequeñas, siendo muchas de ellas galaxias satélite de una de las mayores.

Las galaxias libres giran en torno al centro de masas del grupo, situado entre Andrómeda y la Vía Láctea. El Grupo Local está contenido dentro del supercúmulo de Virgo, cuyo centro gravitatorio es el denominado Gran Atractor, que arrastra a las galaxias a lo largo de una región de millones de años luz, y hacia el cual se dirige el Grupo Local.

El Supercúmulo de Virgo, contiene alrededor de 100 grupos y cúmulos de galaxias, entre los que está el Grupo Local, estando dominado por el cúmulo de Virgo, localizado cerca de su centro. Tiene forma de disco plano, con un diámetro de 200 millones de años luz. En comparación, el Grupo Local tiene 3 millones de años luz de longitud máxima. Este supercúmulo es simplemente uno de los millones de supercúmulos del Universo observable.

Por el efecto gravitatorio que ejerce en el movimiento de las galaxias, se estima que la masa total del Supercúmulo de Virgo es de mil trillones de masas solares. Debido a que su luminosidad es demasiado pequeña para dicha cantidad de estrellas, se piensa que una cantidad considerable de su masa está compuesta de materia oscura.

La estructura básica del Supercúmulo de Virgo fue descrita en 1982 por Brent Tully en un exhaustivo artículo. Además del disco plano, que contiene las dos terceras partes de las galaxias luminosas, pose un halo esférico que contiene el tercio restante. Posee un centro rico en galaxias, rodeado por filamentos de galaxias y otros grupos pobres en galaxias. El Grupo Local está situado en la periferia del supercúmulo, en un filamento que se extiende desde el cúmulo de Fornax al cúmulo de Virgo.

Los primeros indicios de la existencia del Gran Atractor se tuvieron en 1973 y nuevamente en 1978. Su ubicación se determinó finalmente en 1986, y se sitúa en un lugar a una distancia de entre 150 y 250 millones de años luz de la Vía Láctea, en la dirección de la constelación del Triángulo Austral y la constelación de La escuadra del carpintero.

Se piensa que al igual que los cúmulos se agrupan en supercúmulos, asimismo los supercúmulos se agrupan en complejos de supercúmulos, también llamados hipercúmulos, filamentos galácticos o grandes muros. El Supercúmulo de Virgo junto con el Supercúmulo de Hidra-Centauro forman una de las cinco partes que integran el Complejo de Supercúmulos de Piscis-Cetus.

## 9. LA RELACIÓN DE TULLY-FISHER

Los astrónomos Brent Tully y Richard Fisher derivaron de modo empírico en 1977 una ley que establece que la luminosidad de una galaxia espiral es proporcional a la cuarta potencia de su velocidad máxima de rotación, la cual, a su vez, se determina a partir de la anchura de las líneas espectrales, en particular de la línea de 21cm emitida por el hidrógeno neutro de la galaxia.

La relación de Tully-Fisher es otra candela estándar en Astronomía, y al igual que encontrada por Henrietta Swan Leavitt, permite estimar la distancia a la que se encuentra una galaxia espiral a partir de la anchura de las líneas de su espectro.