



Recepción: agosto 12 de 2003
Aceptación: enero 12 de 2004

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario # 100, Toluca, Centro.
Teléfono: (722) 2 96 55 56.
Correos electrónicos: mag@uaemex.mx y rigasa73@yahoo.com

Astronomía, gravitación y modelos cosmológicos

Juana Torres Rojas*, Ricardo García Salcedo* y Máximo A. Agüero Granados*

Resumen. La humanidad ha planteado diversas teorías respecto a su visión cósmica a través del tiempo. En este trabajo se expone en forma sucinta la historia de las teorías cosmológicas. Se parte de las primeras ideas acerca del universo hasta llegar a la teoría general de la relatividad.

Palabras clave: cosmología, astronomía, gravitación.

Astronomy, Gravitation and Cosmological Models

Abstract. The humanity has raised impressive theories with respect to his cosmic vision through the time. In this work we expose in short form the history of the cosmological theories. We began by the first ideas on the universe until arriving at the general theory of relativity.

Key words: cosmology, astronomy, gravitation.

Introducción

Desde los tiempos más remotos, el ser humano ha sentido la necesidad de conocer mejor el universo: ¿de qué está hecho?, ¿cómo surgió? y ¿cómo terminará? Prueba de ello son las múltiples respuestas que se han dado a estas preguntas a lo largo del tiempo, y que en conjunto constituyen la historia del pensamiento cosmológico. El acercamiento a la astronomía o la cosmología, como a cualquier área del conocimiento humano, siempre va acompañado de cierta pasión por lo enigmático de los acontecimientos y fenómenos inherentes a la disciplina.

Aquí trataremos de involucrarnos en algunos temas apasionantes tanto de astronomía como de cosmología, tales como el universo inflacionario, la materia oscura o la que no vemos, o la muerte de las estrellas, con el fin de tener algún conocimiento o idea acerca del mundo en el que vivimos y establecer un cuadro aceptable

basado principalmente en observaciones, teorías y conjeturas científicas.

La ciencia es un proceso constante, por lo cual nuestras ideas referentes a la naturaleza se modifican día con día, porque cada vez aprendemos más de ella. Comúnmente cualquier persona podrá describir a la naturaleza mediante la restricción de sus sentidos y de las ideas preconcebidas, y no necesariamente basada en conocimientos científicos.

Este texto pretende abarcar ciertos tópicos de la cosmología que directa o indirectamente están ligados con los trabajos realizados por los autores de este artículo.

1. Historia del pensamiento cosmológico

Desde tiempos inmemoriales, una de las mayores preocupaciones del hombre ha sido conocer la naturaleza del universo. Una

visita a Stonehenge, en el sur de Inglaterra, o un recorrido por las ruinas de Chichén Itzá en Yucatán¹ muestran el gran interés que las culturas antiguas tenían por los cielos, y lo que es más importante, el gran interés por la naturaleza y el origen del universo.

A mediados del primer milenio a. C., en las tempranas ciudades griegas de Jonia se inició una especulación racional acerca del universo y sus orígenes. El hombre comenzó a comprenderlo sistemáticamente, con la clara tendencia a dejar de lado la fantasía y superstición. Este entendimiento crucial de que el universo es racional, en lugar de ser contingente y depender de dioses caprichosos, no ocurrió de súbito, sino que representa una de las grandes separaciones en la historia del pensamiento humano.

A principios del siglo XVI, Copérnico dio el paso revolucionario que colocó las bases para la cosmología heliocéntrica que Kepler y Galileo habrían de establecer.

Al terminar el siglo XVII, llegó Isaac Newton, quien revolucionó el pensamiento científico de esa época. Su universo es un mecanicismo gobernado por un solo agente misterioso: la gravitación universal.

La astronomía en los siglos XVII y XIX logró pocos triunfos teóricos o analíticos, sus estudios fueron básicamente observacionales. Nuevos instrumentos y nuevas técnicas llevaron al descubrimiento de fenómenos desconcertantes, que aportaron la materia prima para los desarrollos teóricos de la astrofísica y la cosmología del siglo XX.

La comprensión de los universos isla y las otras galaxias tiene que ocupar un lugar de honor en la lista de realizaciones de ese siglo. El hallazgo del movimiento de recesión universal de esas entidades allanó el camino a la cosmología moderna. La teoría general de la relatividad de Einstein posibilitó el entendimiento de estos rasgos del universo en gran escala y, con la teoría especial, no sólo rebasó los conceptos newtonianos sino que también hizo viable asimilar la generación de energía en las estrellas, de modo que a mediados del siglo XX podía describirse su estructura y evolución. Las grandes cuestiones acerca del origen del universo siguen aún sin respuesta completa, pero el vasto panorama que ofrece la astronomía moderna abruma la imaginación, con implicaciones jubilosas para la cosmología.

A mediados del siglo XX, las técnicas de datación nuclear, especialmente la de meteoritos, habían calculado la edad del sistema solar en poco más de 4,500 millones de años. Esto acotó la edad del



Figura 1. Modelo del universo según los mayas.
Fuente: www.mayadiscovery.com/es/historia/default.htm

universo, la cual, sin duda, es más difícil de establecer, y la datación radioactiva se combinó con los resultados astronómicos basados en la teoría de evolución estelar, que hoy dan al universo una edad probable de más de 12 mil millones de años.

Nadie puede predecir cuáles serán las nuevas verdades por revelar, qué descubrimientos grandes y asombrosos quedan por hacer. La ciencia moderna puede hablarnos de la futura evolución del Sol, aventurar una explicación astronómica de las edades de hielo y de la evolución biológica y aportar una base firme para hacer afirmaciones sobre el futuro del universo, ya sea desde el

enfoque de la relatividad general o desde la segunda ley de la termodinámica; sin embargo, no puede enseñar a la humanidad a utilizar las armas de destrucción que ella ha forjado y con la que parece capaz de destruir su civilización.

2. La primera astronomía

Existe información muy escasa de la naciente conciencia del orden celeste entre las primeras civilizaciones. Para el hombre primitivo, como para nosotros, la regularidad dominante era el ciclo día-noche; el Sol definía el día y la Luna gobernaba la noche. Su importancia al iluminar las sobrecogedoras tinieblas dio a este astro un lugar importantísimo en la superstición.

La astronomía, como esfuerzo sistemático de observación, se originó en Mesopotamia, pero fue en la época asiria cuando empezaron a hacerse observaciones verdaderamente sistemáticas. Por lo que sabemos, el único instrumento astronómico que poseían los mesopotámicos era el gnomon, una especie de cuadrante solar vertical, que consistía simplemente en un palo levantado en un área plana. Con un gnomon pueden determinarse los solsticios a partir de las posiciones extremas de la sombra que deja el sol, y los equinoccios cuando las posiciones de la salida y la puesta del Sol se abren.

Muchos de los avances de la protociencia babilónica ocurrieron en un periodo relativamente breve durante el primer milenio a. C. Probablemente en la revolución precientífica babilónica debieron actuar personas cuyos intelectos podían compararse con los de Aristóteles, Newton y Einstein.

3. Primeras concepciones del universo

En la época prehistórica, el hombre primitivo veneró las imágenes del Sol y de la Luna como grandes deidades, y cuando urgaba el cielo lleno de estrellas le parecía ver la silueta de figuras conocidas.

Cerca del año 6,000 a. C. sucedió la transición entre la civilización nómada y la sedentaria con el surgimiento de la agricultura.

1. Para conocer un poco más acerca de la cosmología maya, se puede revisar la página web: <http://www.mayadiscovery.com/es/historia/default.htm>

Por lo tanto, las comunidades requerían conocer en qué época del año se podía sembrar y en cuál cosechar, así como tratar de predecir los fenómenos meteorológicos. Para el año 4500 a. C. ya existía una sociedad compleja en el valle del Tigris y Éufrates, y para el 3000 a. C., en el valle del Indo. Además de la agricultura, la navegación fluvial y la marítima también exigían conocer los movimientos del Sol y las estrellas.

Al comienzo de la civilización algunos hombres se dedicaron por completo a estudiar los misterios que encierra el universo. En Mesopotamia los sacerdotes llevaban un gráfico detallado de los movimientos del Sol, la Luna y los planetas que les permitía predecir

los eclipses lunares, sin comprender a ciencia cierta la causa de este fenómeno. También trazaron la trayectoria que seguía el Sol cada año.

Hablando de la cosmología babilónica, podemos decir que los primeros mitos sumerios datan, al menos, del tercer milenio a. C. Podemos encontrar una explicación específica y detallada de la creación del universo en el *Enuma Elish* ("cuando arriba"), que describe el origen del mundo en un conflicto entre las fuerzas del caos y los dioses (Heidel, 1951).

Debido a que Egipto es, con excepción de la fértil franja del valle del Nilo, un desierto vasto e inmutable, su religión se basó en Ra el dios Sol, el dios creador de la mitología egipcia. Ra adopta diversos aspectos complementarios, más que conflictivos, para encadenar las diversas funciones atribuidas al Sol (Parker, 1974).

De todas las civilizaciones del Viejo Mundo, sólo la china llevó registros de los eclipses ocurridos desde el año 1361 a. C. y construyó numerosos observatorios. Esta civilización fue una rival digna de la mesopotámica en cuanto a la precisión de sus observaciones. Por otro lado, en América, los mayas fueron los astrónomos por excelencia. En muchas formas su calendario era más conveniente que nuestro sistema de semanas, meses y años. Predijeron eclipses y calcularon la duración del año solar y del mes lunar con asombrosa precisión. Como sólo se han podido descifrar los números mayas y no su escritura, no conocemos desgraciadamente el contenido total de su conocimiento (Bergamini et al., 1966).

Cuando el hombre diseñó los primeros relojes de arena, atisbó los movimientos del cielo y dividió el año en días, meses y estaciones. Las estrellas guiaban el camino al nómada y al marinero. Al agricultor y al ganadero, las fases de la Luna y el viaje anual del Sol les indicaban la época de siembra y lluvia.

A los ojos de los primeros astrónomos (los primeros observadores), el cielo era una gran bóveda en la cual se encendían, noche tras noche, pequeños puntos. El Sol se movía diariamente a través de la gran bóveda; también observaron que la Luna crecía y menguaba en el cielo nocturno en un ciclo de 29 días.

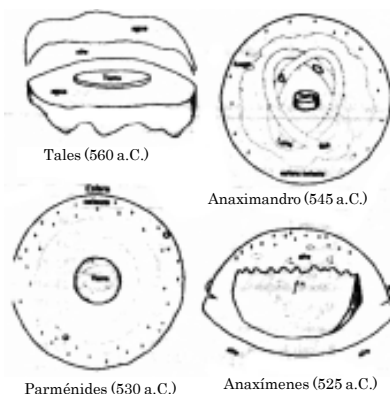


Figura 2. Modelos griegos.

Fuente: Durham y Purrington, 1989.

Pero aun esta representación tan simple planteaba grandes problemas, ya que cualquier persona podía ver que la trayectoria seguida por el Sol a través del cielo no es invariable; por otro lado, el cambio de estaciones propiciaba calor, frío, inundaciones y sequías. Un registro periódico de los movimientos de la Luna ayudó a marcar los cambios de estaciones de una forma aproximada.

En los comienzos de la civilización, la astronomía caminaba de la mano con la astrología y las antiguas teocracias. Los primeros astrónomos científicos aparecieron en la civilización griega y utilizaron la geometría, que al desarrollarla junto a la astronomía, la

convirtieron en un medio de estudio muy valioso. La mejor escuela griega de astronomía surgió al sur; en Mileto, Tales concibió la redondez de la Tierra en el año 600 a. C.

Por el 500 a. C., o poco después, los pensadores griegos no sólo especularon acerca de los orígenes del universo, sino también pusieron por escrito sus ideas. Hombres como Anaximandro, Parménides y Pitágoras intentaron sistemáticamente entender el universo y sus orígenes. Al cabo de un siglo, Aristóteles había producido una obra monumental de síntesis que no sería superada durante 16 siglos.

Los griegos tuvieron diferentes cosmologías, las principales se muestran en la figura 2. Después de ellas, entró en el juego Pitágoras, quien tenía una concepción distinta acerca del universo. Este modelo es descrito por Filolao, contemporáneo de Sócrates. En el universo pitagórico, la Tierra no sólo es esférica sino que se mueve; junto con el Sol, la Luna y los planetas, circunda un 'fuego central' en el núcleo del universo (véase figura 3). La Tierra gira en torno del fuego central en un periodo diurno de 24 horas. La misma cara de la Tierra siempre va al fuego central, el Mediterráneo al lado exterior, lejos del fuego central. Este movimiento 'rodante' para la Tierra equivale a la rotación sencilla de un cuerpo mayor, y así, los pitagóricos estaban proponiendo la rotación de la Tierra, símbolo característico de los modelos planetarios geocéntricos. Tenían evidencia de nueve movimientos circulares en el cielo, los de las estrellas fijas, los de los cinco planetas y los de la Tierra, la Luna y el Sol. Pero mezclaron su brillante deducción con la numerología mística, y como nueve era un número imperfecto, elevaron el total a 10, por lo que sugirieron que había un planeta siempre entre la Tierra y el fuego central, el Antichton, que desempeñaba dos funciones: protegía a la Tierra de los rayos directos del fuego central y hacía que el número de objetos móviles del universo fuera 10, el número perfecto según los pitagóricos (Bergamini et al., 1966).

Los argumentos de Platón (427-347 a. C.) acerca de la astronomía destacan tanto la confusión como la amplitud de criterio de aquella

época. Al principio, Platón imaginó que los dioses recorrían el cielo en brillantes carros de guerra (Teoría del Carro Alado). Más tarde empezó a preguntarse si la Tierra era plana o redonda; se decidió por la redondez basándose en la forma de la sombra de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse. Pero al principio concibió a la Tierra como un cuerpo inmóvil, centro de todas las cosas. Más tarde vio que la rotación de la Tierra sobre su eje y posible revolución en una órbita se ajustaban mejor a la evidencia. Finalmente, al llegar a la ancianidad, Platón se sentía apenado, porque había imaginado a la Tierra en el centro del universo, lugar reservado a algo más valioso.

Después de la conquista de Alejandro el Grande, cuando la capital de la cultura griega fue trasladada de Atenas a Alejandría, en Egipto, la escuela de astronomía que afirmaba el movimiento de la Tierra continuó proponiendo teorías certeras. Aristarco de Samos sostenía que la Tierra giraba, se trasladaba y no era el centro del cosmos. Seleuco observó que las mareas están relacionadas con las fases de la Luna. Eratóstenes comparó observaciones del Sol hechas en puntos distantes 800 kilómetros uno del otro, y calculó la circunferencia terrestre. Sin embargo, para la mayoría de los griegos, la idea de estar girando en la carrera diurna de la Tierra con rocas, piedras y árboles siguió siendo herética. Quienes vislumbraron la verdadera naturaleza del sistema solar no apoyaron sus ideas en una explicación matemática coherente que tuviera en cuenta las observaciones de los astrónomos.

A medida que pasaba el tiempo, los observadores de estrellas adquirían una imagen más sólida y más complicada de los movimientos que percibían en el cielo. Hiparco, uno de los astrónomos griegos más cuidadosos y científicos, formuló la teoría final. Hacia el año 150 a. C. trabajó en Rodas y Alejandría y de acuerdo con sus observaciones y cálculos, la Tierra, esférica, estaba fija. El Sol, la Luna y los planetas giraban en el espacio alrededor de su propio punto, pero a la vez cada uno de estos puntos orbitaba alrededor de la Tierra estacionaria. El mérito de la complicada geometría de Hiparco fue que presentó con precisión los movimientos que observaron los primeros astrónomos, como el retrógrado, cuando un planeta parece reducir su velocidad, detenerse y después regresar sobre sus pasos en el cielo.

Claudio Tolomeo perfeccionó el sistema de Hiparco por el año 140 d. C. y se transmitió a lo largo de la Edad Media en forma de una enciclopedia astronómica, el famoso *Almagesto* de Tolomeo. Este trabajo, conocido como sistema tololámico, resistió las pruebas de observación durante 13 siglos.

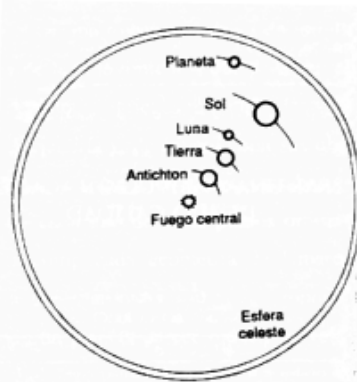


Figura 3. Modelo de Pitágoras.
Fuente: Durham y Purrington, 1989.

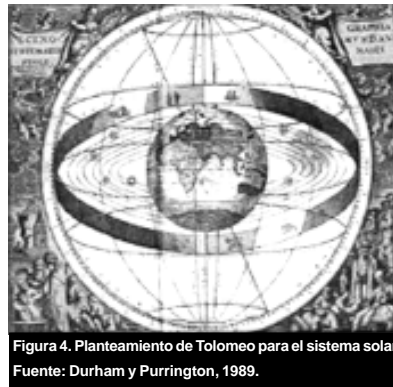


Figura 4. Planteamiento de Tolomeo para el sistema solar.
Fuente: Durham y Purrington, 1989.

Las más grandes dificultades técnicas a las que se enfrentaron los griegos fueron tiempo y número, entorpecieron su visión y ayudaron al sistema tololámico a cruzar sin tropiezos los siglos del oscurantismo. El tiempo era un problema porque no había modo preciso de medirlo, y el número, porque no había modo de expresarlo. En el sistema usado por los romanos y los griegos alejandrinos, las más pequeñas cifras astronómicas parecían casi inexpresables. En números romanos, la distancia a la Luna se escribiría CCXXXMMMMMMMMDCCLVII en lugar de 283,857 millas (384,320 km). Sólo Arquímedes de Siracusa (287-212 a. C.) manejó con soltura las grandes cifras. Podemos tener una idea de su magnitud inventiva por el hecho de que formuló la mayoría de las leyes matemáticas que gobiernan el comportamiento de palancas, poleas, engranes e hidráulicas, así como la estática de los fluidos.

De esta manera, llegamos a la época entre los siglos XVI y XVII, un periodo de grandes cambios que quedó plasmada en la obra de Nicolás Copérnico y de otros cuatro hombres: Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galileo Galilei e Isaac Newton.

3.1. Nicolás Copérnico

Fue el primero en aplicar el sistema heliocéntrico en astronomía; es decir, consideraba que todos los planetas giraban en torno al Sol. Edificó su elaborado sistema heliocéntrico para los planetas sobre un puñado de sus propias mediciones (menos de 50 observaciones en toda su vida), junto con todas las ya publicadas que tenía a la mano. Hubo dos fallas en esto. Primero, la confianza injustificada en la precisión de todas las mediciones; segundo, Copérnico y todos los que precedieron fueron víctimas de una trampa particular: la falacia del movimiento circular compuesto.

3.2. Tycho Brahe

Fue el más grande de todos los astrónomos pretelescopícos. Por medio de estudios sistemáticos con instrumentos grandes y finamente trabajados, logró hacer observaciones limitadas por la resolución del ojo. Propuso su propio modelo planetario, el sistema tichónico, según el cual el Sol y la Luna giran alrededor de la Tierra, mientras que todos los planetas giran alrededor del Sol. Las observaciones de Tycho fueron muy numerosas: casi mil estrellas catalogadas con exactitud, los planetas fueron seguidos con una precisión de dos a tres minutos de arco, los cometas lo fueron con dificultad, y al final se descubrió que estaban detrás de la Luna; se demostró que eran inexistentes ciertas irregularidades que Copérnico se había esforza-

do por explicar. De esta manera, quedó preparado el escenario para el descubrimiento de los verdaderos movimientos de los planetas. Tycho no tuvo iguales, ningún teórico lo guió en sus esfuerzos, ningún espíritu de competencia lo motivó y, sin embargo, sin sus mediciones Kepler no habría podido encontrar sus leyes planetarias, y el curso de la ciencia del siglo XVI habría sido muy distinto.

3.3. Johannes Kepler

Descubrió el verdadero movimiento de los planetas. Sus preocupaciones fueron una mezcla de intransigente astronomía matemática y el más nebuloso de los misticismos analógicos. La mayoría de sus descubrimientos se basan en una simetría geométrica que le produjeron poca satisfacción. Enunció las leyes que rigen el movimiento planetario, las cuales llevan su nombre.

- Primera ley: los planetas se desplazan en una órbita elíptica, con el Sol en uno de sus focos;
- segunda ley: una línea trazada del Sol a un planeta recorrerá áreas iguales en tiempos iguales;
- tercera ley: los periodos de los planetas aumentan uniformemente con la creciente distancia desde el Sol, que es el cuadrado del periodo proporcional al cubo de la distancia media del planeta al Sol.

Toda duda acerca del papel esencial del Sol queda suprimida por estas leyes. Kepler pensó que el Sol era como un gran imán giratorio que atraía los planetas en torno a él. Resulta revelador que en estas especulaciones se preocupara por la dinámica, que durante dos mil años no había sido un elemento en astronomía.

3.4. Galileo Galilei

Llevó el telescopio a la astronomía y la investigación sistemática a la dinámica. Por medio de sus descubrimientos, la distinción entre el cielo y la tierra quedó en gran parte borrada, y el aristotelismo recibió un golpe mortal. Aunque Galileo no introdujo la experimentación en la física, sí fue el primero en mostrar su fuerza y en fundir los principios, en apariencia opuestos, de la experimentación y del razonamiento matemático en una metodología científica unificada. Promovió el papel decisivo de la experimentación planeada de forma minuciosa, sobre la base de la teoría previa, en oposición a la simple observación y del valor predictivo de la teoría matemática. En 1609, construyó su primer telescopio y pronto perfeccionó un modelo que amplificaba 30 veces. Para 1602 había hecho un buen número de notables descubrimientos astronómicos. Observó la naturaleza montañosa de la superficie de la Luna, mostró que no era en lo básico distinta de la Tierra y observó, por primera vez, los cuatro grandes satélites de Júpiter. El descubrimiento de que las estrellas seguían apareciendo como puntos, aun si se les amplificaba 30 veces, destruyó uno de los argumentos de Tycho Brache contra el sistema copernicano. Las observaciones de Galileo no sólo inauguraron la era de la astronomía telescópica, que posibilita la percepción de objetos invisibles a simple vista, sino que también ejercieron profunda repercusión sobre el entendimiento humano del universo.

3.5. Isaac Newton

Al aprovechar la combinación de observación y razonamiento deductivo que Galileo había aplicado a los problemas del movimiento terrestre, Isaac Newton demostró matemáticamente lo que Galileo planteaba: que el universo físico no se compone de dos esferas sino que es un mundo con un conjunto de leyes físicas. Además, Newton supuso que estaba descubriendo la naturaleza y no sólo salvando las apariencias. Sus leyes o axiomas del movimiento son elegantes e inevitables y, junto con la gravitación universal, explican los movimientos planetarios y terrestres en forma absolutamente convincente.

Los astrónomos habían dado a Newton bastante materia prima en forma de observaciones precisas de los movimientos lunares y planetarios, gran parte de ellas destiladas en las leyes de Kepler. Las matemáticas de la época no eran adecuadas para dar un tratamiento completo al movimiento como lo había descubierto Galileo. Por ello, Newton inventó el cálculo diferencial e integral, hecho que por sí solo bastaría para indicar su genio.

3.5.1. La dinámica newtoniana

Newton comenzó por definir las cantidades que entran en la descripción del movimiento: masa, fuerza, impulso y aceleración. Un punto de partida lógico es la crucial idea de que sólo puede comprenderse el movimiento concentrándose en los cambios en movimiento. La ley de la inercia (primera ley de Newton) declara que un cuerpo continuará moviéndose en línea recta con velocidad constante si nada actúa sobre él, de tal forma que cambie su estado de movimiento o reposo. De este modo, se necesita un agente para que los planetas cambien de dirección, pero no para hacerlos mover. La medida del cambio de la velocidad es la aceleración, y Newton llamó fuerza a la causa del movimiento. Así, "la aceleración es causada por una fuerza" (Newton, 1999). La descripción del movimiento puede escribirse así: la aceleración es proporcional a la fuerza. Para convertir esta proporcionalidad en una ecuación (llamada la segunda ley de Newton), multiplicamos por un factor m llamado masa inercial, que es una medida de la resistencia al cambio en el movimiento, de modo que $ma=F$. Por tanto, la masa debe de ser función de la 'cantidad de materia' del objeto.

Newton comprendió, como antes lo hicieron Christiaan Huygens y Robert Hooke, que la atracción gravitacional entre dos objetos decrece al aumentar la separación. Considérense dos masas m y M , separadas por una distancia R ; la ley de la gravitación afirma que cada masa experimenta una fuerza gravitacional hacia la otra de magnitud:

$$F=(GmM/R^2),$$

donde G es una constante; la fuerza sólo depende de las masas y su separación R , y no de otra propiedad. En particular la fuerza es independiente del estado de movimiento de los objetos.

En este punto es necesario mencionar ciertos momentos de la personalidad de Newton. Por aquellos tiempos, Hooke tenía un puesto de secretario de las sesiones de la Academia Imperial de Ciencias del Reino Unido. Su trabajo consistía, entre otras tareas, en comprobar experimentalmente todos los trabajos que llegaban a la academia. Durante 30 años sistemáticamente lo realizó. En una carta dirigida a Newton, explicaba el descubrimiento de la ley universal de gravitación y le solicitaba su apoyo para una fundamentación matemática más sólida. Desgraciadamente Newton nunca le respondió y trató por todos los medios de ocultar estos hechos, incluso llegó a quemar, cuando ocupaba cargos administrativos en la academia imperial de Inglaterra, muchos de los documentos escritos de Hooke. Cuando Newton entregó la primera versión de su obra monumental a su profesor Edmond Halley para su publicación, este último se la devolvió con el argumento de que debería citar a Hooke en su trabajo. Newton lo hizo pero lo colocó en una lista de varios otros científicos, como un investigador de segunda.

De regreso al tema, puesto que la fuerza gravitatoria universal es proporcional al producto de las dos masas, la magnitud de la fuerza es la misma para cada uno de los dos cuerpos interactuantes. Newton quedó pasmado por esta simetría y propuso que todas las fuerzas de la naturaleza ocurren entre parejas de objetos. Esta regla, llamada tercera ley del movimiento de Newton, dice que "por cada fuerza que actúa sobre un objeto hay otra fuerza, de la misma magnitud pero de dirección opuesta, que actúa sobre el mismo objeto" (Newton, 1999).

La dinámica newtoniana fue aplicada con gran éxito al problema de los planetas. Los matemáticos de la Europa continental vieron que sus triunfos en la mecánica celeste hacían verosímil la cosmología newtoniana de que el universo había evolucionado hasta su forma presente como resultado natural de la gravitación, proceso que requería un tiempo inmenso. Poco a poco, la cosmología se convirtió en dominio de la astronomía y de la física. Newton había demostrado el marco del sistema del mundo mejor de lo que él mismo había creído, aunque gran parte de su idioma sería suplantado en el siglo XX.

4. Cosmología moderna

Preguntarse el origen del universo era principalmente saber cómo había surgido el sistema solar. El primero en dar una teoría para ello fue Piere Simon Laplace en 1796, quien sugirió que el Sol y los planetas se formaron en una nebulosa en rotación que se enfrió y colapsó. Se condensó en anillos que eventualmente formaron los planetas, y una masa central que se convirtió en el Sol. La baja velocidad de rotación del Sol no podía explicarse.

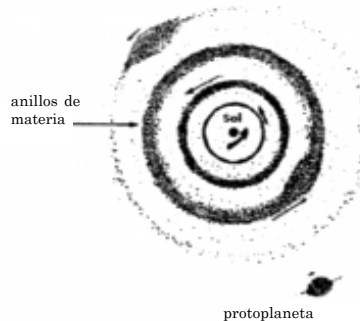


Figura 5. Modelo de origen del sistema solar de Laplace. Fuente: Durham y Purrington, 1989.

La versión moderna asume que la condensación central contiene granos de polvo sólido que ocasiona roce en el gas al condensarse el centro. Eventualmente, luego que el núcleo fue frenado, su temperatura aumentó y el polvo se evaporó. El centro que rota lentamente se convirtió en el Sol, y los planetas se formaron a partir de la nube que rota más rápidamente.

Comenzaremos nuestra visión moderna del universo a través de la vida y obra de Albert Einstein. El año de su nacimiento, 1879, es una fecha conveniente para examinar los triunfos y fracasos de la física

newtoniana en su forma madura. La disciplina había crecido hasta abarcar una amplia gama de fenómenos. Enriquecida con la introducción del concepto de energía y el principio de su conservación, la dinámica se había extendido para incluir el estudio de los procesos dependientes de la temperatura. De tales estudios surgió la termodinámica, cuyas ecuaciones muestran las propiedades más generales de la materia. Se aceptó, en conjunto, que los efectos termodinámicos debían estar fincados en el comportamiento de la estructura de los átomos que forman la materia, pero no hubo ninguna teoría newtoniana satisfactoria de la estructura atómica. Tampoco era probable que se desprendiera de la termodinámica, cuyas variables se determinan por promedios sobre enormes números de átomos, de modo que quedan ocultas las propiedades atómicas detalladas. Por otro lado, se esperaba descubrir la estructura de la materia al remontar la fuente de los efectos electrodinámicos a la escala atómica, a los portadores de la carga eléctrica.

Los más grandes científicos dedicados a la electrodinámica, Michael Faraday y James Clerk Maxwell, se comprometieron con el concepto de campo. Un campo es la región que rodea a una fuente de fuerza electromagnética (o por extensión, una fuente de cualquier índole de fuerzas, por ejemplo la gravitación). La idea es que las fuerzas no son causadas por acción directa entre dos objetos, sino cuando un objeto entra en la región de influencia (el campo) de otro. Así el campo interviene al hacer que el espacio entre los objetos (y dentro de ellos) sea parte activa del proceso dinámico.

Einstein empezó a leer libros sobre electromagnetismo cuando aún era estudiante en la universidad de Zurich; algunos años después, sus trabajos escritos abrieron nuevos caminos en la termodinámica; uno de ellos le valió su doctorado, mientras que otro, publicado en 1905, presentaba de la manera más sorprendente la hipótesis cuántica. Mediante el razonamiento de que la luz estaba formada por cuantos de energía, resolvía los problemas que tenía un experimento que actualmente se conoce como efecto fotoeléctrico (y que le valió el Premio Nobel). Su texto *Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles*, encarnaba la teoría especial de la relatividad, una nueva descripción del espacio y del tiempo.

Según Einstein, los cuerpos no se movían en el espacio por el efecto de fuerzas que definían sus trayectorias; lo que realmente sucedía era que ellos recorrían líneas rectas, aunque las masas de los objetos celestes curvaban el espacio de manera que las trayectorias aparecerían como curvas.

5. La teoría de la relatividad especial

Tras las ideas planteadas por Hendrik Antón Lorentz, Albert Einstein comenzó a ser reconocido al recopilar en 1905 unas ideas similares, si bien desarrolladas de manera independiente y sin conocimiento de las primeras, en una teoría que pasaría a los libros de historia como la teoría de la relatividad especial. En realidad, la comunidad científica la acogió con cierto escepticismo, y el hecho de ser publicada en alemán hizo, además, que en un principio pasara inadvertida en algunos países como Francia e Inglaterra. El tiempo, como siempre, se encargaría de hacer justicia.

La teoría especial de la relatividad está sorprendentemente libre de complejidades matemáticas, ya que Einstein empezó con un par de postulados de los cuales se deducen las trascendentales consecuencias de la relatividad especial. Se deja que la observación o el experimento decidan, si es posible, la validez de la teoría (Einstein, 1985). Este enfoque, tan característico de los primeros escritos de Einstein, no es más que uno de tantos caminos hacia el descubrimiento científico. Plantea dos suposiciones generales:

Principio 1: Las leyes físicas tienen la misma forma para todos los observadores inerciales.

Principio 2: La velocidad media de la luz es la misma para todos los observadores inerciales, con independencia del movimiento o del observador.

El primero es el 'principio de relatividad' que vuelve 'especial' a la teoría, por su limitación a los observadores inerciales u observadores no acelerados. Así pues, cada observador se mueve a una velocidad constante en relación con todos los demás observadores inerciales. El segundo postulado, la constancia universal de la velocidad de la luz, entraba en conflicto con la teoría del éter de la electrodinámica. El paradójico comportamiento que este principio afirma puede cambiarse, como lo demostró Einstein, por el de que no hay tiempo universal o absoluto.

Fue hasta 1907 cuando pudo vislumbrarse la auténtica esencia que se escondía detrás de las ecuaciones de la teoría de la relatividad. Hermann Minkowski, un eminente matemático alemán que había sido profesor de Einstein en la universidad, se dio cuenta de que, a pesar de que entre dos sucesos los observadores podían medir una distancia y un incremento de tiempo diferentes, cierta combinación de ambos era siempre la misma.

El efecto era prácticamente lo mismo que se observaba a la hora de medir distancias espaciales. Imaginemos a dos personas en un globo determinando la distancia de una casa. La primera, de pie en la cesta, podría decir que el inmueble se encuentra a tantos metros hacia abajo, tantos hacia delante y otros tantos hacia su derecha. La segunda, que podría estar tumbada y con la cabeza orientada a otro lado, daría

cifras distintas de estas tres cantidades, pero su combinación ofrecería la misma distancia que en el caso anterior.

En el universo, donde por lo general las velocidades son lo suficientemente grandes como para que los efectos de la relatividad se hagan evidentes, sucedía lo mismo pero con la inclusión del tiempo a las otras tres dimensiones espaciales. Así, espacio y tiempo quedaron entrelazados en una unión inquebrantable: el espacio-tiempo haría del universo un hogar de cuatro dimensiones para la humanidad.

Sin este entendimiento, la teoría no habría sido más que una colección de fórmulas, y su belleza se perdería como si se mirara un cuadro y no se viese más que un lienzo sin figuras ni colores.

6. La teoría general de la relatividad

Einstein, a pesar del avance que supuso su teoría de la relatividad especial, no quedó satisfecho del todo. Si bien el nacimiento del espacio-tiempo iluminó el cosmos con una nueva luz, aún faltaba incluir en este escenario la fuerza que movía sus componentes: la gravedad (Carroll, 1997).

Diez años de trabajo fueron necesarios para que en 1915 se publicara la revolucionaria teoría general de la relatividad, en la que se planteaba una hipótesis realmente innovadora. Según Einstein, los cuerpos no se movían en el espacio por el efecto de fuerzas que definían sus trayectorias; lo que realmente sucedía era que ellos recorrían líneas rectas, aunque las masas de los objetos celestes curvaban el espacio de manera que las trayectorias aparecerían como curvas.

Para explicar las órbitas de los planetas, Newton había dibujado un punto que simbolizaba el Sol, y una elipse a su alrededor. Einstein, en cambio, había trazado una línea recta y había doblado el papel, que simbolizaba el espacio, hasta que la línea tomara forma elíptica.

Puede parecer, en principio, que ambas hipótesis sean equivalentes, pero hay maneras de distinguirlas con observaciones astronómicas. La relatividad general, por ejemplo, debido a la mayor curvatura del espacio-tiempo en las proximidades del Sol, permite explicar una pequeña desviación de la órbita de Mercurio, de la que la teoría de Newton no podía dar cuenta.

Einstein propuso otra manera de comprobar si su teoría era cierta. Consistía en observar la luz de las estrellas que pasara rozando la

superficie del Sol. Si su teoría era correcta, los rayos se desviarían; en caso contrario, la luz seguiría su camino imperturbable y no podría observarse alguna desviación. Por desgracia, tal observación no podría realizarse hasta que un eclipse ocultara el brillo intrínseco del Sol, y las circunstancias favorables llegaron hasta 1919.

De esta manera, tras los análisis de los datos obtenidos gracias a las distintas observaciones del eclipse, sir Arthur Eddington lanzó a Einstein a la fama internacional, confirmada ya su teoría de modo prácticamente irrefutable. Hasta entonces el descubridor de la relatividad había pasado inadvertido, sobre todo porque procedía de Alemania, uno de los países perdedores de la primera guerra mundial. Ahora ninguna excusa podía relegarlo al anonimato.

A pesar de los grandes éxitos, Einstein perdió la oportunidad de ser quien dio a conocer el primer modelo cosmológico en expansión. En 1917, sin querer limitarse al sistema solar, escribió un artículo en el que aplicaba sus ecuaciones al universo entero, hecho que significó el nacimiento de la cosmología moderna.

Los primeros resultados de la teoría de la relatividad general, no obstante, fueron muy difíciles de aceptar, incluso para Einstein. Según las ecuaciones de la relatividad, el universo no podía estar quieto, y debía expandirse o contraerse. Para corregir tal efecto 'indeseable', se incluyó una fuerza que compensara la gravedad, la

famosa constante cosmológica, con la que se obtuvo el cosmos estático e inmutable deseado (Straumann, 2002).

Hasta 1929, cuando Edwin Powell Hubble descubrió que el universo se expandía, Einstein fue consciente de su error, que calificó como el más grave de su vida. Un científico que había roto el rígido molde del pensamiento de una época había sido, de esa manera, derrotado por sus propios prejuicios. Sin duda fue una lección que nunca olvidaría. Por mucho que costara asimilarlo, el universo era una especie de plastilina elástica en expansión, con las galaxias formando sus pequeños reinos en forma de pozos espacio-temporales. Como de costumbre, la naturaleza no permitía que nadie le dijera cómo debía ser.

A partir de entonces, la cosmología relativista empezó a vivir un esplendor que la acompaña hasta nuestros días. Multitud de modelos han aparecido para dar respuesta a observaciones cuyos datos inundaban las universidades, pero siempre siguiendo el camino que se abrió en 1917. Había empezado una carrera imparable, y la historia sería su mejor testigo.

Hasta aquí hemos presentado sólo algunas ideas acerca de cómo diferentes culturas han concebido el universo y algunas de las teorías físicas en las que está basado el modelo más aceptado actualmente para describir el origen y evolución del cosmos.



Bibliografía

- Bergamini, D. (1966). *El universo* (Colección de la Naturaleza de Time-Life). Ediciones Culturales Internacionales. 2ª. Edición. México.
- Carroll, S. (1997). *Lecture Notes on General Relativity*, <http://arXiv.org/abs/gr-qc/9712019>
- Durham, F. y R. Purrington (1989). *La trama del universo: historia de la cosmología física*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Einstein, A. (1985). *El significado de la relatividad*, Origen-Planeta. México.
- Heidel, A. (1951). *The Babylonian Genesis*. University of Chicago Press.
- Newton, I. (1999). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Bernard Cohen y Anne Whitman (traductores). London.
- Parker, R. A. (1974). "Ancient Egyptian Astronomy", en Hodson, F. R. (ed.). *The Place of Astronomy in Ancient World*. Oxford University Press.
- Straumann, N. (2002). *The History of the Cosmological Constant Problem*, <http://arXiv.org/abs/gr-qc/0208027>