

La Relatividad General y la Cosmología

La teoría general de la relatividad es uno de los dos pilares de la ciencia moderna. Por un lado está el modelo estándar, basado en la mecánica cuántica, que nos explica como se comporta el mundo microscópico. La relatividad general, en cambio, nos aclara el comportamiento de los astros y del cosmos. En este trabajo voy a relatar la historia de como la relatividad general cambio nuestro concepto del universo para siempre.

Para empezar este relato voy a platicar un poco sobre los principios en los que se basa primero, la teoría especial de la relatividad y luego basada en esta última, la teoría general. Einstein quería resolver un problema epistemológico, es decir, a él le interesaba resolver un problema filosófico que se discutía desde hacía algún tiempo. Vamos a recordar una experiencia que de seguro todos hemos tenido. Cuando vamos en un tren a gran velocidad y disparamos una pistola desde el tren en dirección del movimiento, la bala adquiere una gran velocidad con respecto a la persona que disparó. Para la persona con la pistola, la bala lleva una velocidad enorme, pero para una persona que ve esta acción desde un lugar parado en la estación del tren, la bala adquiere la velocidad que le da el disparo más la velocidad del tren, como en la figura 1.

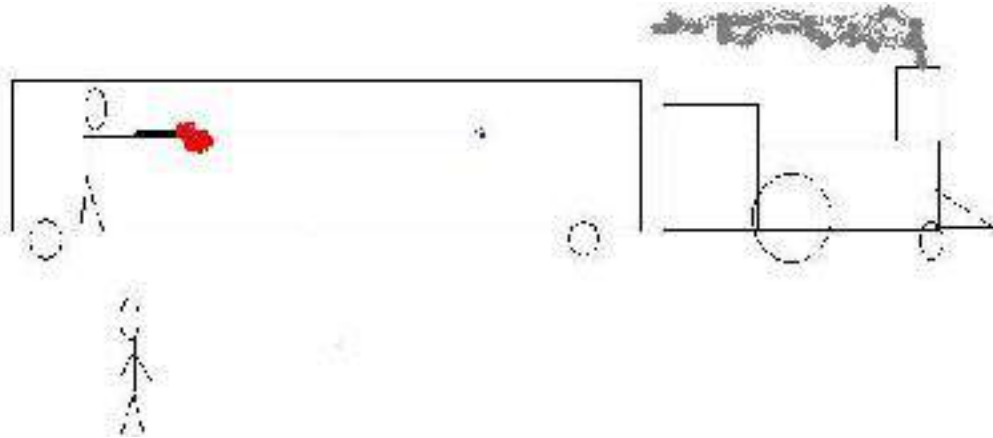


Figura 1.

Ambos observadores miden una velocidad diferente para la bala, pero es importante notar que de cualquier forma ambos ven el mismo fenómeno, que consiste en que la bala es disparada desde el tren. Esta experiencia todos la podemos llevar a cabo. Para el observador en la estación del tren, la bala adquiere una velocidad que es la suma de la velocidad del tren más la que le imprimió la pistola. Vamos a extrapolar nuestro experimento a otro nivel. Vamos a suponer por un momento que la luz se comporta como balas disparadas desde un tren. Veamos la Figura 2. Ahí observamos dos autos, uno rojo y uno verde que se mueven en dirección a los observadores que están justo enfrente de ellos. Los autos emanan fotones constantemente, rayos de luz, y por tanto los observadores ven el desarrollo del proceso todo el tiempo. Vamos a suponer que el proceso de suma de velocidades se lleva a cabo incluso con la luz. Entonces los rayos de luz que salgan en dirección del movimiento de los autos obtendrán la velocidad del auto más la velocidad propia de la luz. Pero los fotones o rayos de luz en dirección perpendicular a los autos, solo viajarán a la velocidad de la luz. Ahora supongamos que los autos viajan muy rápido y a la misma velocidad, como ambos están a la misma

distancia del centro del cuadro, se encontrarán justo en el centro y chocarán. Pero analicemos que ve cada observador. Para la persona de la izquierda, los fotones del auto verde viajan más rápido que los del auto rojo. Entonces él verá que el auto verde llega primero al centro del cuadro que el auto rojo, se despedaza y luego choca con el auto rojo. Evidentemente algo anda mal, pues la causalidad no se cumple, primero se ve el efecto y luego la causa. Aun más, para el observador de abajo son los fotones del auto rojo los que viajan más rápido, de nuevo es la suma de la velocidad del auto más la velocidad de la luz. Este observador verá entonces que es el auto rojo el que llega primero, se desbarata y luego llega el auto verde y lo choca. Este observador también ve que se viola causalidad pero al revés. Es decir, los observadores no solo ven que se viola causalidad, sino que cada observador ve el fenómeno de una forma muy diferente.

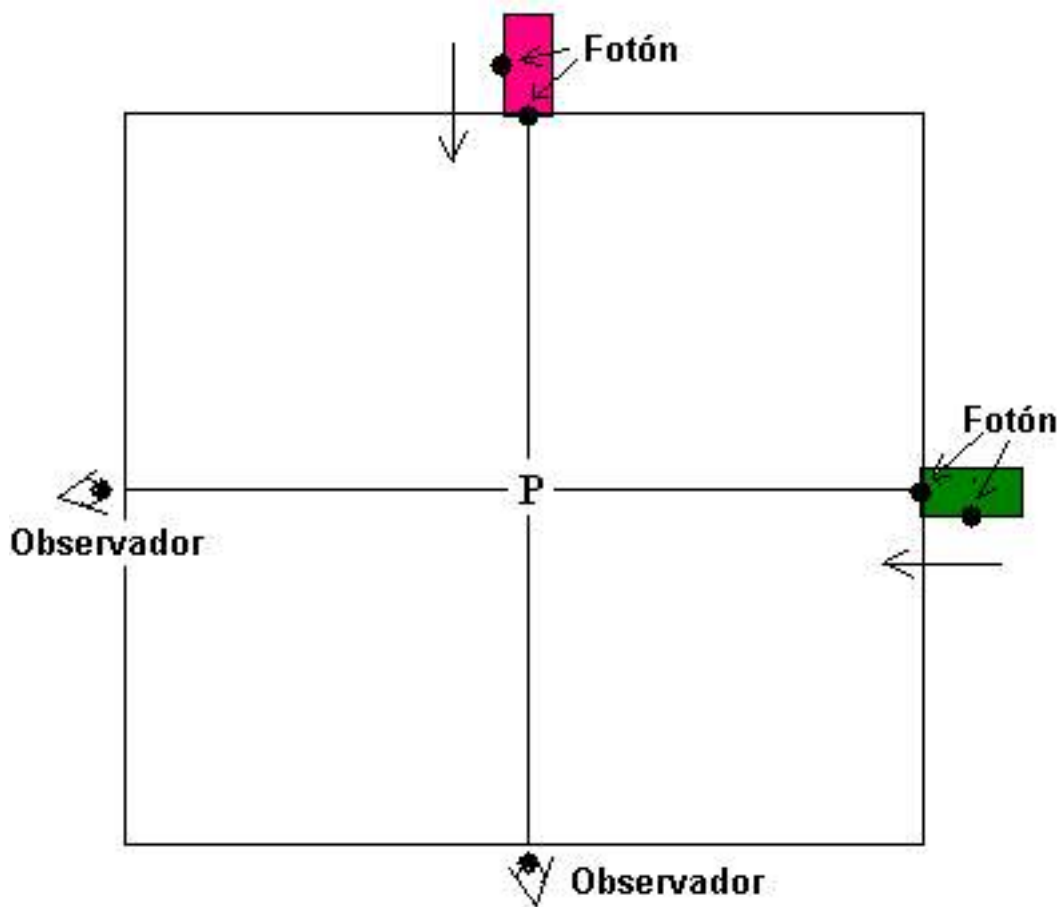


Figura 2.

Einstein era un filósofo realista, para él los fenómenos no pueden depender del observador y el principio de causalidad es inviolable. A toda causa sigue un efecto y no al revés. Para Einstein esto es inaceptable, se viola causalidad y los dos observadores ven un fenómeno distinto. Dos de los principios del realismo filosófico más importantes son violados si aceptamos que las velocidades se suma a cualquier costo. Einstein resolvió este problema epistemológico postulando que todos los observadores ven la misma velocidad de la luz, no importa en donde se encuentran ni como viejen. La velocidad de la luz es absoluta.

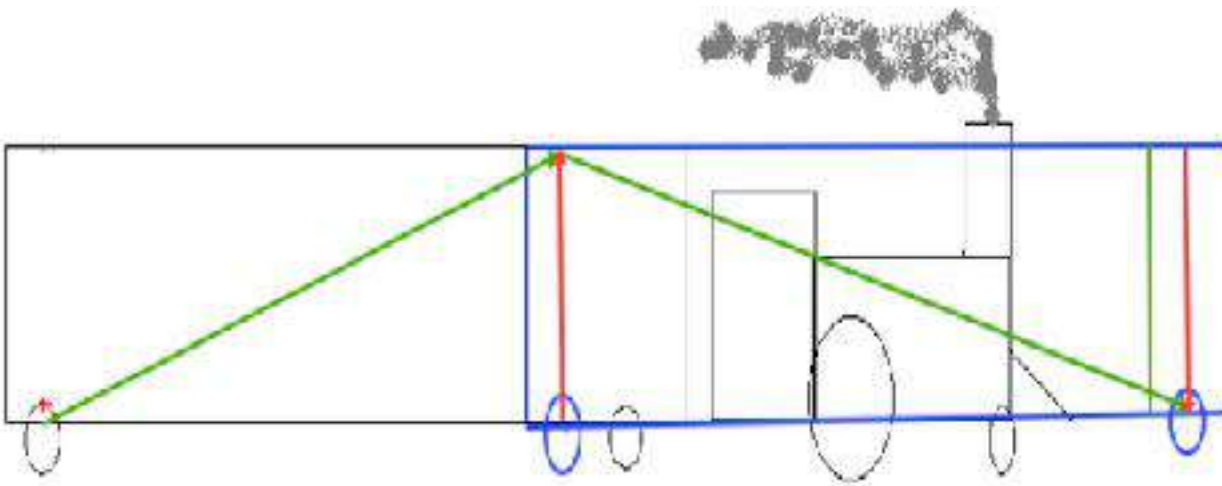


Figura 3.

Este postulado tiene efectos que aparentemente son absurdos, pero no lo son en absoluto. Para ver esto, hagamos un “Gedanken experiment” (experimento mental). Supongamos que en un tren una persona pone un espejo en el techo y ilumina este techo con una lámpara. Obviamente el rayo de luz sube y se refleja en el techo llegando a la lámpara de nuevo, como en la Figura 3 el rayo rojo. Pero para una persona que está fuera del tren y ve el fenómeno desde la banqueta el rayo de luz viaja una distancia mucho mayor, pues se tiene que tomar en cuenta el movimiento del tren, como en la Figura 3 el rayo verde. Entonces, para que los dos observadores vean el mismo fenómeno, es decir, que el rayo de luz sube al techo y se refleja para llegar a la lámpara, la distancia que debe medir el observador de afuera debe ser menor y el tiempo mayor que la que mide el observador en el tren.

Ahora veamos la Figura 4, donde se representan los rayos rojo y verde. La distancia recorrida por el rayo de luz vista por el observador parado en la estación de tren recorre una distancia $c\Delta t$, donde Δt es el tiempo que tarda el rayo en viajar la distancia de subida y bajada. Vamos a tomar solo la distancia D de subida. En ese tiempo el tren recorre la distancia $v\Delta t$, donde v es la velocidad del tren. Si usamos el teorema de Pitágoras en el triángulo que se forma con las distancias recorridas por el rayo y el tren, encontramos la fórmula abajo de la Figura 4. De ahí podemos obtener una fórmula del tiempo Δt recorrido por el rayo visto por el observador en la estación en verde, respecto al tiempo $\Delta t'$ recorrido por el rayo visto por el observador en el tren, en rojo. Esta fórmula está escrita en la parte de abajo a la derecha de la Figura 4. Observemos la fórmula. Supongamos que la velocidad v del tren es mucho menor que la velocidad de la luz, digamos 1000 Km/h, es decir, que recorre 1000 kilómetros en una hora, o lo que es lo mismo, casi 0.3 kilómetros en un segundo. La velocidad de la luz es 300 mil kilómetros por segundo. En la fórmula aparece el cociente v/c al cuadrado. Si usamos los valores que indicamos arriba, este cociente da un millonésimo, que al cuadrado nos da un billonésimo, esto es, un uno después de doce ceros. En la fórmula aparece $1-(v/c)^2$, con los números escritos aquí, esto es 1.000000000001, lo cual es realmente 1. Por lo que los dos lapsos de tiempo son lo mismo. Pero si la velocidad del tren es cercana a la velocidad de la luz, digamos 90% la velocidad de la luz, esto es $0.9c$, entonces $\Delta t = 2.3\Delta t'$, es decir, el tiempo que tarda el rayo en subir y bajar es 2.3 veces mayor para el observador en la estación del tren que para el observador en el tren. El tiempo se dilata. Y si hacemos las mismas cuentas para la

distancia recorrida, vamos a observar que la distancia se contrae. Por absurdo que parezca, este fenómeno se observa constantemente en los fenómenos de la naturaleza, ha sido comprobado una y otra vez a lo largo de estos más de 100 años.

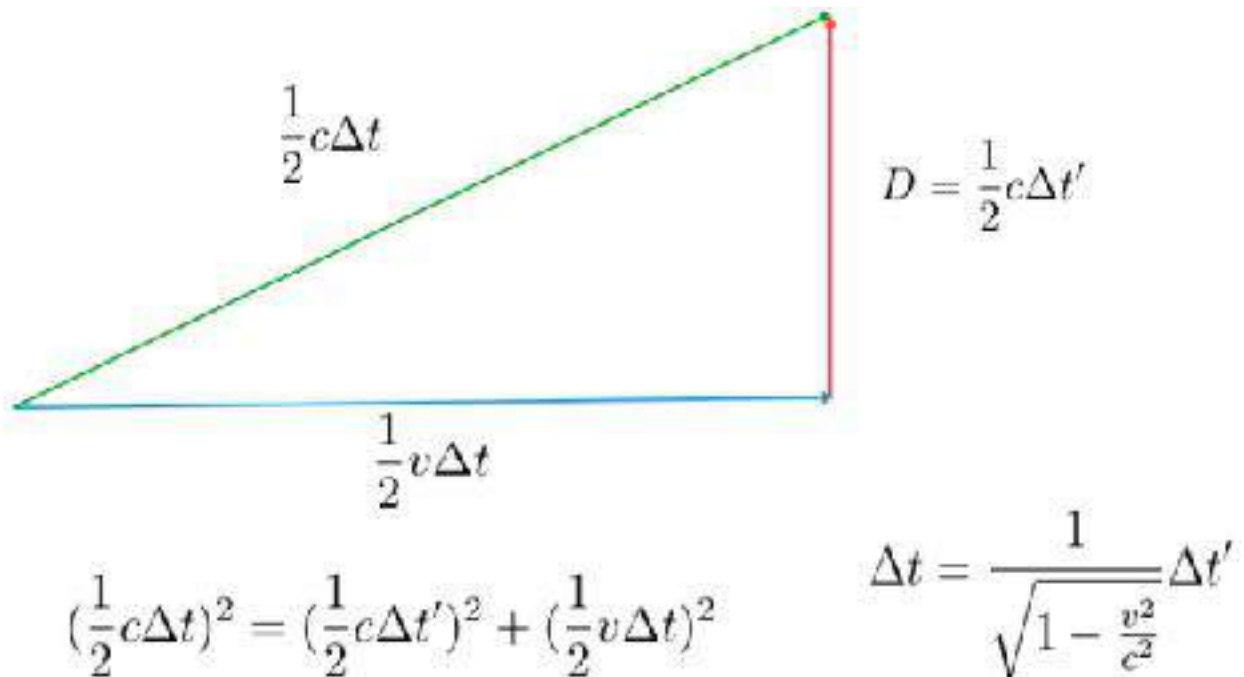


Figura 4.

La conclusión de Einstein fue que las distancias medidas de tiempo y espacio no son absolutas, son relativos al observador para que ambos vean el mismo fenómeno. Si queremos que los observadores vean el mismo fenómeno, tenemos que aceptar que para cada observador las distancias y el tiempo son elásticos, cada observador los mide diferente. Por supuesto esta idea causó gran revuelo en toda la comunidad científica y de pensamiento.

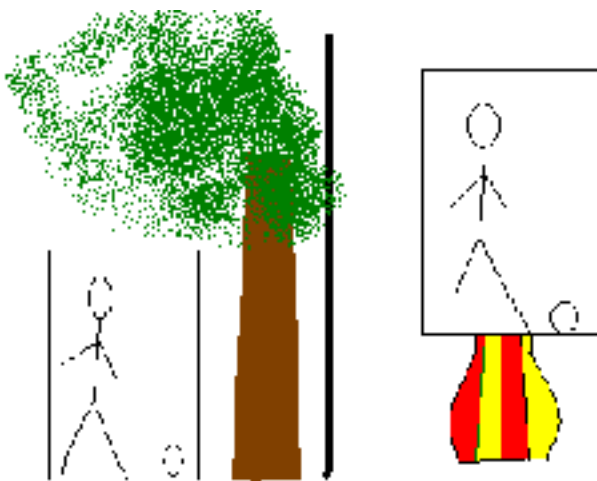


Figura 5

Pero el problema no quedó ahí, entre los años 1908 a 1915 Einstein trabajó en las consecuencias de esta idea. Su problema ahora era como introducir la interacción de la gravedad en su teoría. Para esto recordemos las siguientes experiencias. Imaginemos

que una persona está dentro de una caja negra que se encuentra en un bosque en algún lugar de la Tierra. Al mismo tiempo imaginemos la misma caja negra, pero ahora impulsada por un cohete que acelera la caja a la misma aceleración de la gravedad, como en la Figura 5. La persona que está dentro no puede distinguir si está en el bosque o si está en una nave espacial. Esta observación llevó a Einstein a darse cuenta que un observador acelerado es equivalente a un observador en un sistema gravitatorio. Este punto es esencial. Ahora hagamos otro "Gedanken experiment". Imaginemos un círculo de diámetro D y circunferencia $C = \pi D$ en el cual ponemos una varillas en el diámetro y otras en la circunferencia y colocamos un reloj en el centro y otro sobre el círculo mismo y lo hacemos girar a una gran velocidad, como en la Figura 6. Las varillas sobre la circunferencia están sujetas a una aceleración centrípeta constante, es decir, están aceleradas, para nuestro propósito, es equivalente a que están sujetas a una fuerza gravitatoria. Imaginemos que sobre la circunferencia la velocidad de las varillas es cercana a la de la luz. Entonces, como ya vimos según la teoría de la relatividad especial de Einstein, las varillas sobre la circunferencia se contraen con respecto a las varillas que están sobre el diámetro, pues estas últimas se mueven perpendiculares a la circunferencia. Por otro lado, el reloj sobre la circunferencia se atrasa respecto del que está en el centro. Esto es, la relación $C = \pi D$ ya no se cumple, el espacio se modificó y el tiempo sobre la circunferencia cambió. Es decir, un sistema sujeto a aceleración constante modifica su espacio y su tiempo. Pero en la tierra todos estamos sujetos a una aceleración constante, la de la gravedad. Einstein concluyó entonces que la gravedad modifica el espacio-tiempo. En otras palabras, las interacciones gravitacionales entre objetos se dan porque cada objeto modifica el espacio tiempo de su alrededor.

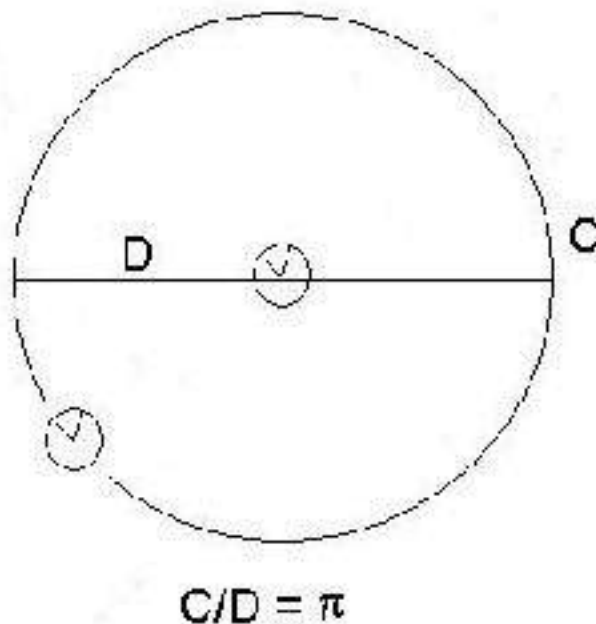


Figura 6

La otra parte de esta teoría consiste en la siguiente observación. Si un objeto no está sujeto a ninguna fuerza este se mueve en una línea recta, la cual es la trayectoria más corta entre dos puntos en un espacio plano. El espacio plano es el espacio no modificado, es decir, en donde no hay fuerzas de gravedad. Einstein postuló que los objetos se mueven en las trayectorias más cortas en los espacio modificados y los comparó con los

sistemas en donde hay fuerzas con gravedad. Se tardó varios años hasta encontrar las ecuaciones que gobiernan a los espacio-tiempo modificados por cuerpos que modelaran la gravedad. El resultado fue una nueva forma de entender las interacciones entre cuerpos: todo objeto material (o energético) modifica el espacio tiempo, haciendo que los cuerpos de alrededor se muevan en las trayectorias mínimas entre dos puntos. Es decir, en esta teoría ya no existen las fuerzas (al menos la de la gravedad), la interacción entre cuerpos se da por la curvatura del espacio tiempo provocada por la existencia de la materia. Para esto, materia se entiende como todo lo que existe (fuera de la conciencia), como las partículas, los campos o la energía. La revolución de esta teoría consiste en postular que las interacciones entre la materia son debido a la geometría, las fuerzas no existen.

Por supuesto, todas estas afirmaciones e ideas son muy bonitas, pero tienen que estar de acuerdo con la realidad. Durante los siguientes 100 años se han llevado a cabo experimentos y observaciones que han confirmado de una manera extraordinaria la teoría de Einstein, incluso en donde él pensaba que estaba equivocado, resultó ser que Einstein tenía un acierto. Pero sin duda el lugar en donde la teoría de Einstein ha tenido mayor repercusión es en su forma de ver el universo. En lo que sigue vamos a concentrarnos en las consecuencias que tiene la teoría de Einstein en la formación y origen del Cosmos. Para ver esto con mayor énfasis, vamos a relatar un poco la historia de la imagen del universo que los seres humanos hemos desarrollado. Por supuesto este tema lo han tocado todas las culturas del mundo de una forma diferente, pero aquí vamos a platicar solo la línea de pensamiento europeo.

La idea del Cosmos que dominaba después de la época greco-romana fue ideada por Claudio Ptolomeo a principios de nuestra era, basado en las experiencias de sus maestros, que esencialmente eran geómetras. Esta idea consistía en que la Tierra era el centro del universo, la Luna, el Sol y los planetas giraban alrededor de la Tierra y la bóveda celeste, con las miles de estrellas que alumbraban en la noche, se movía fija alrededor de nosotros. De hecho, para un observador del cielo nocturno, esta impresión se da a primera vista y coincide muy bien con nuestra arrogancia, pues si somos hechos a imagen y semejanza de Dios, debemos ser el centro del universo. La idea de Ptolomeo era que los astros giraban en círculos alrededor nuestro, primero la Luna, luego Mercurio, Venus, el Sol y así sucesivamente todos los astros del firmamento. Las esferas fijas eran el sostén de estos. A veces estas trayectorias tenían un retroceso, a lo que Ptolomeo atribuyó la existencia de un segundo círculo, como en la Figura 7.

Los planetas son los únicos puntos luminosos en el cielo que no se mueven pegados a la bóveda celeste, se desplazan a lo largo de los días siguiendo trayectorias singulares. Durante semanas se ve que avanzan circularmente, pero de repente, durante algunos días parecen retroceder. El modelo de Claudio Ptolomeo era capaz de explicar estos singulares movimientos pero a expensas de utilizar círculos sobre círculos hasta tener un modelo mucho más complicado que la idea original.

Esta idea perduro por más de mil quinientos años, hasta que en el siglo XVI, Nicolás Copérnico (1473-1543) reformuló la idea de Claudio Ptolomeo pero ahora suponiendo que el Sol era el centro del Universo. Copérnico propuso que la Tierra giraba alrededor del Sol en órbitas circulares, algo que los pensadores de la época no podían admitir, pues si eso fuera cierto, pensaban ellos, deberíamos sentir ese movimiento giratorio. Por ejemplo, al lanzar una piedra perfectamente vertical al aire, ésta debería de retrasarse por el movimiento de la Tierra y debería caer desviada de su trayectoria vertical, algo que claramente no les mostraba la experiencia de aquel entonces.

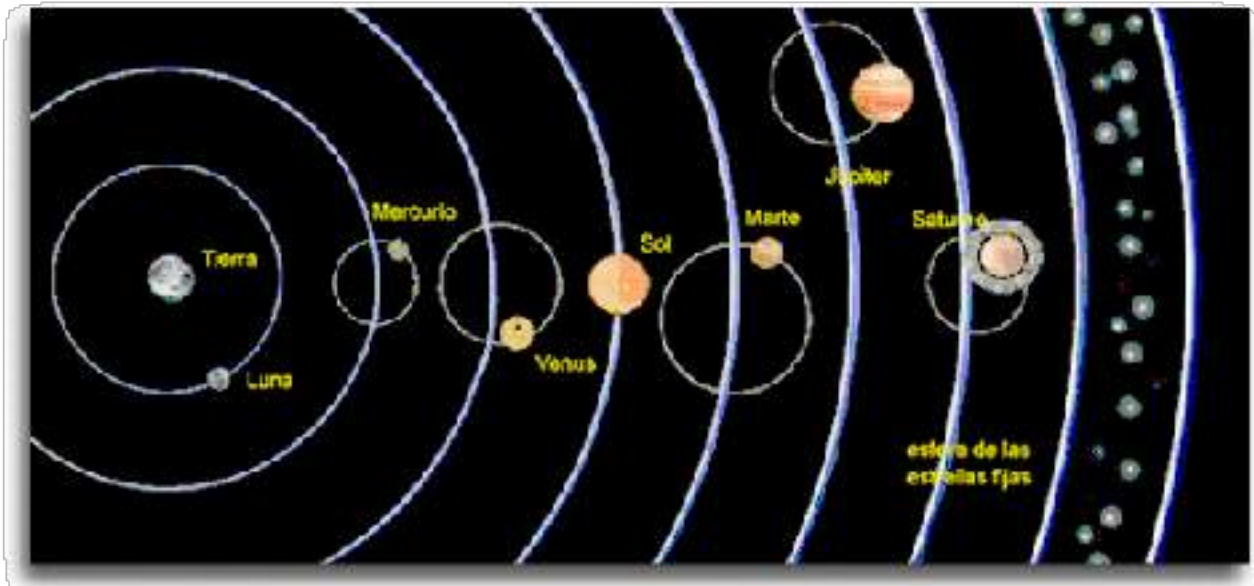


Figura 7.

Volviendo a la astronomía, Johannes Kepler (1571-1630), matemático y astrónomo alemán que venía de una familia luterana, aprendió en la Universidad de Tübingen la idea de Copérnico para entender el movimiento de los planetas. Kepler acudió a Tycho Brahe (1546-1601), en Praga, quien tenía un conjunto de observaciones muy exactas sobre el movimiento de los planetas; de hecho, las observaciones de Tycho Brahe son consideradas las observaciones astronómicas más exactas realizadas a ojo desnudo, ya que la invención del telescopio se inventó después de su muerte. Kepler usó esas observaciones para ajustar su modelo, basado en el Copernicano. Este primer modelo originalmente consistía en ajustar los cinco poliedros perfectos a los cinco planetas conocidos. Después pensó que si Dios era perfecto, también usaría las curvas más perfectas que se conocen, los círculos. Así que intentó durante mucho tiempo ajustar las observaciones de las órbitas planetarias a círculos concéntricos con el Sol ubicado en el centro de los mismos, pero eso tampoco funcionó. Entonces, después de toda una vida de intentos, logró ajustar las observaciones de Brahe a un modelo donde el Sol está en el foco de una elipse y los planetas giran alrededor del Sol en órbitas elípticas. Este modelo era ingenioso, mucho más simple que el complicado modelo Ptolemaico y ajustaba las observaciones astronómicas de manera muy precisa. Como se ha vuelto típico desde entonces, Kepler aceptó el modelo que ajustaba las observaciones prefiriéndolo sobre aquellos acordes con su ideología o religión o con la consistencia matemática, que en este caso deberían ser las órbitas circulares.

Pronto el modelo de Kepler también planteó nuevas y peligrosas preguntas filosóficas. Si la Tierra no está en el centro del Universo y es uno más de los planetas existentes, entonces cabía la posibilidad de que el hombre no fuera el ente superior de la creación de los Dioses. Esta nueva concepción del Universo tenía su similar en el descubrimiento del Nuevo Mundo por Colón. Los habitantes del nuevo continente no están descritos en la Biblia y no tienen en ella conexión con los europeos que son los descendientes directos de la creación de Dios. Algunos sacerdotes católicos no consideraban a los indios como humanos, pues no provenían de Adán y Eva. Afortunadamente, Kepler vivía en una zona

donde las nuevas ideas no eran mal vistas y no tuvo gran problema por exponer sus conceptos.

Pero casi al mismo tiempo, Galileo Galilei, que trabajaba en la Universidad de Pisa, mejoró un instrumento inventado por los árabes para ver de lejos al enemigo en batalla, pero que él conoció de los holandeses y al que llamó telescopio. Con este instrumento, Galileo observó Júpiter y notó que este planeta tiene varias lunas girando alrededor de él. Los satélites de Júpiter son la evidencia más clara contra la teoría aristotélica que afirmaba que más allá de la Luna todos los cuerpos eran perfectos y giraban alrededor de la Tierra. Él se dio cuenta que Júpiter era evidentemente un modelo en pequeño del sistema solar y llegó a la misma conclusión que Kepler. El 4 de marzo 1610, Galileo publicó en Florencia el resultado de sus primeras observaciones estelares en "El mensajero de las estrellas" (Sidereus Nuncius), afirmando que el Sol era el centro de nuestro sistema estelar, lo que apoyaba el modelo de Copérnico. Galileo obtuvo muchas recompensas por sus descubrimientos, pero este éxito, como siempre, desencadenó los celos de algunos de sus contemporáneos. Estos ataques se basaron principalmente en el salmo 93 (92) de la Biblia que dice: «Tú has fijado la tierra firme e inmóvil.», que da a entender que el modelo bíblico del sistema solar geocéntrico (con la Tierra en el centro) es el correcto. Entonces, el cardenal Belarmino, el mismo que mandó quemar a Giordano Bruno, realizó una investigación teológica de la obra de Galileo con lo que se inició una censura de su obra. El 25 y 26 de febrero de 1616 la censura es ratificada por la Inquisición y por el papa Pablo V, y 17 años después, el 22 de junio 1633, en el convento dominicano de Santa María sopra Minerva en Roma, Galileo es condenado a prisión de por vida, pena que afortunadamente es conmutada por el entonces papa Urbano VIII por reclusión de por vida en su casa.

Galileo no solo desarrolló el telescopio, también estudió la dinámica de los cuerpos y cuenta la leyenda que subido en la torre inclinada de Pisa estudió el movimiento de caída libre de los cuerpos. También observó que existe una oposición de todos los cuerpos materiales a cambiar de movimiento, a la cual ahora llamamos inercia. Todos hemos sentido esta oposición, por ejemplo cuando viajamos en un auto o en autobús. Cuando el autobús frena sentimos un impulso hacia la dirección del movimiento de éste y tenemos que sujetarnos de algún lado para no caer. Cuando vuelve a arrancar, la fuerza que ejercemos para no caer la practicamos hacia el otro lado; en cualquiera de los dos casos, nos tuvimos que oponer al cambio de movimientos. Cuán difícil es cambiar el movimiento de un objeto depende de su masa; cuanto más masivo, más difícil resulta ponerlo en movimiento o detenerlo. Por otro lado y muy distinta a la inercia, hay una fuerza que hace que los cuerpos caigan atraídos por la Tierra a la cual llamamos fuerza de gravedad. Cuanto más pesado es un objeto, decimos que siente una mayor fuerza de gravedad. Para medir la diferencia de la fuerza de gravedad con la inercia, Galileo dejó caer dos piedras de diferente tamaño desde la torre inclinada de Pisa. Por un lado, lo que uno espera es que la piedra más grande sea más pesada y por tanto sienta una fuerza de gravedad más grande que la pequeña; la conclusión es que debe llegar al suelo primero. Pero por otro lado la piedra grande por ser más masiva tiene también más inercia y ejerce mayor resistencia a cambiar de movimiento. ¿Cuál piedra llega primero al piso, la grande o la chica? Antes de Galileo, el concepto de inercia no se conocía bien, por lo que la respuesta inevitablemente era que la piedra más pesada caía más rápido y llegaba primero al piso.

Para Galileo, que fue quien le dio su forma moderna al concepto de inercia, la respuesta no era tan evidente, y realizando diversos experimentos llegó a la conclusión de que si las piedras se sueltan al mismo tiempo, las dos caen iguales. Esto quiere decir que la inercia

crea más oposición para que se mueva la piedra grande y la fuerza de gravedad también es mayor por ser la piedra grande más pesada. Como las piedras, la grande y la pequeña, caen de la misma manera, eso indica que la masa inercial, que mide la inercia de un cuerpo, y la masa gravitatoria, que mide cuánta fuerza de gravedad sufre un cuerpo, deben compensarse una a la otra de manera muy exacta. Dos conceptos tan distintos, inercia y fuerza de gravedad, deben poseer alguna equivalencia entre sí. A esta afirmación se le llama ahora el Principio de Equivalencia, y ha sido probado en diversas circunstancias con gran exactitud, comprobándose el hallazgo de Galileo. Vale la pena mencionar que este Principio de Equivalencia fue la inspiración principal de Albert Einstein para formular la Teoría General de la Relatividad, la cual es nuestra teoría moderna de la gravitación y por la que Einstein es reconocido como uno de los grandes genios de la humanidad.

Estos descubrimientos desataron curiosidad por sus implicaciones por toda Europa. El paradigma de que la Tierra era el centro del Universo, que implicaba a su vez que el hombre es el centro de la creación, se terminó. El avance del conocimiento continuó pero debió emigrar a tierras más liberales fuera de la jurisdicción de la Santa Inquisición. Isaac Newton trabajó en la Universidad de Cambridge, Inglaterra, y usó los trabajos de Galileo y Kepler para formular una nueva teoría física del movimiento de los cuerpos materiales, para lo cual se ayudó de una nueva herramienta matemática llamada cálculo diferencial e integral. Esta herramienta matemática fue desarrollada por el mismo Newton y de manera independiente por Gottfried Leibniz quien estudió en la Universidad de Leipzig, Alemania.

Newton descubrió que la fuerza de interacción que actúa sobre la Tierra, esa que hace que las manzanas o lo que sea caiga al suelo, era la misma fuerza que mantiene a los planetas, las galaxias y a todo el Universo en equilibrio. Esto implica que si se pueden formular afirmaciones para la dinámica de los cuerpos en la Tierra, estas afirmaciones se pueden extender a todo el Cosmos. Newton logró entonces resumir en la sencilla fórmula, $F = ma$, la fuerza es igual a la masa por la aceleración del cuerpo, toda la dinámica del Universo. Con esta fórmula es posible explicar el movimiento de un carruaje en un camino, de un ferrocarril subiendo una montaña, de las ruedas y palancas de una maquina, de los planetas en su trayectoria alrededor del Sol, del Sol alrededor de la galaxia, y de las galaxias en el Universo.

La teoría de Newton implicaba que las estrellas en el Universo siempre se atraen entre sí, pero esto indicaba que no podían estar en equilibrio tal y como se les veía, pues la fuerza de gravedad las atrae unas con otras, deberían de colapsarse en un solo punto. ¿Entonces, qué las mantiene tan quietas? La única manera de resolver el problema era que para cada estrella siempre debería existir otra estrella del lado opuesto en el cielo para equilibrarla. Así, por ejemplo, la atracción del Sol con Alpha Centauro debe de equilibrarse con otra estrella atrás de Alpha Centauro, de otra forma esta última se atraería con el Sol y chocarían. Del otro lado del Sol también hay estrellas que deben de equilibrar la fuerza de gravedad de las más cercanas. Pero atrás de la estrella atrás de Alpha Centauro debería de haber otra estrella que equilibre a esta última y del otro lado igual, y así con todas. Por supuesto, de aquí se sigue que este proceso no puede tener fin, pues las últimas estrellas, al no tener contrapeso, se acercarían a las que siguen en su frontera y esto rompería el equilibrio, por lo que el Universo debería ser infinito. Pero si es infinito en el espacio, lo tendría que ser también en el tiempo. De esta forma surgió la idea de un Universo infinito, que ha existido por siempre gobernado por las leyes de la mecánica descubiertas por Newton.

Esta idea del universo perduró durante más de 200 años hasta que en 1917 Einstein publica el primer modelo cosmológico, en el sentido moderno del término, que aparece como consecuencia de aplicar su Teoría General de la Relatividad al Universo conocido en ese entonces. Einstein imaginó un Universo homogéneo, isotrópico, estático y de un tamaño infinito. Sin embargo, que el Universo fuera estático no era una implicación natural de la misma Relatividad General, como pronto lo demostró el matemático ruso Alexander Friedman. En 1922 Friedmann descubrió que las ecuaciones de Einstein implicaban un universo cambiante, no estático. En 1924 concluyó que de la teoría de Einstein se desprendían tres posibilidades para la historia del Cosmos.

La primera consistía en un universo que iniciaba con un tamaño pequeño y por tanto muy caliente, que luego se expandía hasta un tamaño finito máximo para después colapsarse y volver a su estado inicial, este universo se vería como una pelota, pero en 3 dimensiones. La segunda posibilidad tiene el mismo inicio, pero en ella el Universo se expande por siempre, este universo sería plano. En la tercera el universo inicia de igual manera que las otras dos, pero en la que este se expande también por siempre pero con un espacio no plano. De manera independiente en Bélgica, el sacerdote católico Georges Lemaître encontró los mismos resultados y tuvo una controversia postal con Einstein, quien se resistía a aceptar las predicciones teóricas de su propia teoría, que habían encontrado tanto Friedmann como Lemaître, en las que el Universo tenía un origen, se expandía y podía tener una extensión infinita.

Para resolver la controversia, Einstein introdujo en sus ecuaciones una constante, que conocemos ahora como la constante cosmológica, que actuaba como fuerza anti-gravitacional. Con esta fuerza adicional efectivamente se obtiene un Universo estático, tal como Einstein deseaba, pero que resulta ser inestable; es decir, cambiando aunque sea un poco las condiciones del Universo, éste o se expandía o se contraía, tal y como habían dicho Friedmann y Lemaître. Así que ni la constante cosmológica pudo inclinar la balanza en favor de esta idea.

Finalmente la respuesta vino de la observación del Universo. En 1929, Edwin Hubble, un abogado, matemático y astrónomo egresado de la Universidad de Chicago, usó el telescopio más grande del mundo hasta ese momento, en la Figura 8, publicó un análisis de la velocidad radial de las nebulosas que había calculado utilizando el corrimiento al rojo provocado por su velocidad de alejamiento con respecto de nosotros. Este análisis indicó que las galaxias se alejan de nosotros y lo hacen con mayor velocidad entre mas alejadas estén. Estos resultados claramente muestran un Universo en expansión, tal y como lo predicen las ecuaciones de Einstein. El mismo Einstein viajó al Observatorio del Monte Wilson en las cercanías de Pasadena, California, dependiente del Instituto Carnegie en donde trabajaba Hubble para discutir esos resultados. Al final Einstein se convenció de que el Universo estaba en expansión y reconoció que la introducción de la constante cosmológica a sus ecuaciones era la "peor medida de pata de su vida", aunque como veremos después, su error no fue tan grande. Las consecuencias del descubrimiento de la expansión del Universo son extraordinarias. Si el Universo está en expansión y recorremos hacia atrás en el tiempo, es fácil llegar al conclusión de que en algún momento toda la materia del Universo debió de haber estado junta, en un punto o casi en un punto. El hecho de que el Universo se inicie en una región muy pequeña implica que la materia de esta región debió haber sido muy densa y por tanto muy caliente. A esta etapa del Universo los físicos la llamaron Hot Big Bang, o en español, Gran Explosión Caliente.



Figura 8

En una región muy caliente los fotones, es decir, las partículas cuánticas de la luz, de los rayos X, los rayos infrarrojos, en fin, de toda radiación electromagnética, tienen un momento cinético muy grande y son capaces de chocar con otras partículas provocando alteraciones en su movimiento. Como ya vimos, esto sucede en general para cualquier fotón energético, tales como los de los rayos X y los rayos gamma.

De la misma forma, en esa sopa muy caliente que era el Universo temprano, todas las partículas chocaban unas con otras con gran intensidad y con esto mantenían un equilibrio termodinámico, es decir, mantenían la misma temperatura. Si el universo se expande, esta sopa caliente se enfría poco a poco causando que los choques entre las partículas más ligeras y las más pesadas dejen de suceder, ya que al bajar la energía las partículas más ligeras ya no tienen suficiente inercia para alterar a las más pesadas. Es como si quisiéramos alterar la trayectoria de un trailer de 20 toneladas con una pelota de béisbol. Si la pelota es lanzada por un cañón muy poderoso la pelota puede mover al camión, pero si la lanzo yo con mis manos, el trailer ni se dará cuenta de la existencia de la pelota. Este fenómeno sucede poco a poco conforme la temperatura baja, poco a poco las partículas más pesadas son alteradas menos por las más ligeras hasta que los fotones, que no tienen masa, ya no tienen suficiente energía para seguir alterando la trayectoria de ninguna partícula. La partícula más ligera es el electrón, así que por último los fotones tienen choques con los electrones, pero al enfriarse el Universo aún más, esos choques dejan de suceder. A partir de allí, los fotones comenzaron su viaje por el Universo entero sin ser alterados. Esta es la radiación de fondo del Universo; son los fotones libres

residuales de los choques entre todas las partículas, y que terminaron por viajar libremente por todo el espacio.

Lo que hemos platicado fue estudiado por primera vez por el físico ucraniano George Gamow, quien egreso de la Universidad de Novorossiia en Odessa y de la Universidad de Leningrado. Gamow estudió bajo la instrucción de Alexander Friedmann en Leningrado, hasta la muerte de éste en 1925. Gamow emigró a los Estados Unidos en donde con sus estudiantes y colaboradores primero trabajó con Ralph Alpher en la formación de los elementos en el Universo después del Big Bang, artículo que publicó con Hans Bethe con el objetivo de que el artículo tuviera los autores Alpher, Bethe y Gamow, haciendo la remembranza de las tres primeras letras del alfabeto griego: alfa, beta y gama. Tiempo después, en un trabajo con Alpher y Robert Herman, calculó que los fotones libres deberían de formar una radiación de fondo del Universo con una temperatura actual de aproximadamente 5K, esto es como -268 grados Celcius, que debía ser la temperatura de los fotones que estuvieron en el inicio chocando con otras partículas. Estos trabajos no tuvieron impacto en su tiempo y quedaron un tanto en el olvido. En estos años existía una antena en New Jersey que podía detectar radiación en estas frecuencias. Esta antena era motivo de experimentación dirigida por dos ingenieros de los Bell Labs, Arno Penzias y Robert Wilson, quienes habían incrementado su poder de detección. Pero ellos, que no conocían ninguno de los artículos publicados sobre este tema descubrieron algo raro. Encontraron que su detector de microondas tenía un ruido que existía todo los días, todos los meses, y que provenía de todas direcciones, vean la Foto III 2. Al principio pensaron que era un problema del aparato. Intentaron todo, incluso habían anidado ahí unas inofensivas palomas. Primero limpiaron el guano producido por ellas, como el ruido no se fue, las mataron, pero el ruido continuaba. Hicieron todo lo que estuvo de su parte para eliminarlo y el ruido no se quitó. Entonces Penzias le llamo a su colega Bernard Burke del Tecnológico de Massachusetts (MIT), quien le informó que el oyó hablar del trabajo de un grupo de cosmólogos de Princeton sobre algo semejante.

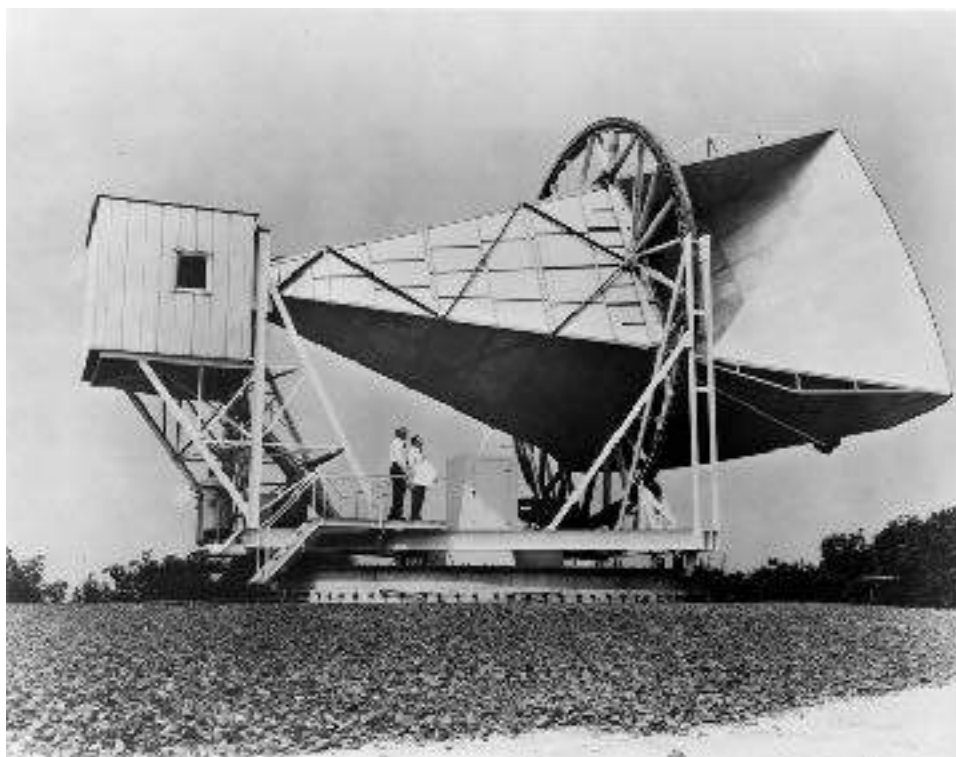


Figura 9.

Efectivamente, hacia tiempo que un grupo de cosmólogos en los que destacaba un joven físico teórico llamado James Peebles y dos experimentales, David Wilkinson y Peter Roll, bajo el liderazgo de Robert Dicke, habían repetido los cálculos del grupo de Gamow sin conocerlos y habían llegado a la misma conclusión sobre la radiación de fondo. Incluso construyeron un aparato de detección de microondas y lo instalaron en la azotea de un edificio de Princeton para detectar algo, pero no detectaron nada. De repente un día, Penzias llamo a Dicke para preguntarle de sus investigaciones. Dicke se dirigió a su grupo y les dijo algo así como: "ya nos ganaron el pan". Dicke y su grupo fueron a New Jersey a ver el aparato y a platicar con Penzias y Wilson. Al final decidieron escribir cada grupo un artículo con sus respectivos resultados en el mismo tomo de la misma revista. Penzias y Wilson escribieron en unas cuantas líneas que detectaron una radiación de todos lados y a todo tiempo que tenía un espectro de cuerpo negro, o sea, de la radiación de un cuerpo caliente, y hacían referencia al artículo del grupo de Dicke para una posible explicación. Mientras el grupo de Dicke reportó la posible explicación como la radiación de fondo dejada por el Big Bang. Esto convenció a muchos de que la teoría del Big Bang podría ser la correcta, dejando a las teorías competidoras al margen. Lo irónico es que Wilson era alumno de uno de los creadores de una de las teorías competidoras. Penzias y Wilson compartieron el Premio Nobel de Física en 1978, junto con el descubrimiento de Hubble de la expansión del Universo, este es el resultado más importante de la cosmología hasta ese tiempo.

Este descubrimiento le dio un nuevo impulso a la Cosmología, surgieron muchas ideas de cómo pudo haberse creado el Universo y sobre cómo se desarrollo. Por ejemplo, era de esperarse que durante el Big Bang se formaran los primeros átomos, pero el cálculo de Alpher, Bethe y Gamow muestra que de esos primeros átomos el 75% fueron átomos de Hidrógeno y el restante 25% eran prácticamente átomos de Helio, con una minúscula porción de Berilio y Litio. Pero entonces, ¿por qué las cosas en la Tierra y nosotros estamos hechos de tantos otros elementos?, ¿de dónde surgieron?

El estudio del núcleo atómico tuvo un gran auge desde la segunda guerra mundial debido a los intereses bélicos de las grandes potencias mundiales. Se creía que el que dominara el núcleo del átomo llegaría a dominar el mundo. Así que todos los países que pudieron hicieron grandes inversiones en la investigación de núcleo atómico. La investigación científica asociada, sin embargo, trajo consigo el entendimiento del núcleo atómico y todas las componentes fundamentales de la materia.

Se entendió que el Sol, para sobrevivir tanto tiempo alumbrando con tanta intensidad, necesita llevar a cabo intensas explosiones de fusión nuclear, fusionando átomos de Hidrógeno para formar Helio. En el centro del Sol se llevan a cabo miles de explosiones nucleares como la de la Bomba H cada segundo, causando una presión del plasma hacia el exterior del Sol, que contrarresta la gravedad. Estas reacciones impiden que el Sol se colapse por la fuerza de su propia gravedad. Pero al irse terminando el Hidrógeno en el centro del Sol, las reacciones continúan con los átomos de Helio para formar átomos de Oxígeno, de Carbono, de Nitrógeno y así sucesivamente. Dentro de aproximadamente 4 mil millones de años el Sol crecerá hasta más o menos la órbita de la Tierra mientras continúa consumiendo sus elementos químicos haciéndolos fusionar y formando más y más elementos de la tabla periódica de los elementos para mantener el equilibrio.

Pero un día, casi repentinamente, ya no habrá nada más átomos que fusionar y el Sol, en una enorme explosión llamada supernova, que será visible en toda la galaxia y en las galaxias cercanas, al mismo tiempo que expulsará gran parte de estos elementos que se formaron en su núcleo al espacio exterior. Este material encontrará después en donde

alojarse, tal vez alimentando otra estrella, o quizás formando un planeta como el nuestro, pero ahora con todos los elementos necesarios para formar vida, y tal vez para formar vida inteligente como en la Tierra.

La conclusión es asombrosa, en el origen del Universo solo había Hidrógeno y Helio, pero los materiales de los que están hechos la mesa donde escribimos, la computadora donde tecleamos este libro, la casa que habitamos, nuestros cuerpos y nuestros cerebros, fueron todos cocinados en el núcleo de las estrellas, y tuvieron que morir una o tal vez varias generaciones de estrellas para que nuestra existencia fuera posible. ¡Qué maravilla! Somos polvo de estrellas: la materia con la que estamos hechos fue creada en el nacimiento del Universo, después cocinada en el centro de las estrellas, las cuales tuvieron que morir para que nosotros pudiéramos existir; ¡es algo verdaderamente fascinante!

Las estrellas se formaron del gas de Hidrógeno y Helio que abunda en las galaxias, y debido a las fuerzas de gravitación que hay se crearon pequeñas zonas con mayor densidad que en el resto del gas. Una región con mayor densidad causa que esta tenga mayor fuerza gravitacional que sus regiones vecinas, provocando que la gravedad jale más materia que a su vez causa más densidad, que a su vez causa más gravedad, y así sucesivamente hasta juntar la masa necesaria para iniciar las reacciones nucleares para que nazca una nueva estrella.

Pero, ¿y cómo se formaron las galaxias en primer lugar? La imagen que hemos descrito para la formación de las estrellas también la podemos aplicar a la formación de las galaxias: lo único que requerimos es que ciertas regiones del Universo tengan una mayor densidad que sus vecinas para iniciar el proceso de acumulación de materia y formar un nuevo objeto cósmico. La clave para la respuesta precisa a esta pregunta la dio la observación detallada de la radiación del fondo cósmico del Universo.

El problema era el siguiente. Las observaciones de Penzias y Wilson indicaban que la radiación de fondo del Universo era homogénea e isotrópica como lo había propuesto originalmente Friedman. Pero la formación de estructura en el Universo requiere que existan pequeñas anisotropías, es decir, regiones en donde haya inhomogeneidades para que regiones con un poco más de materia, por la fuerza de gravedad, jalen más materia y se formen estructuras como las galaxias. Si estas regiones más densas existen, estas jalarán también a los fotones provocando que se hagan un poco más rojos que el resto y por lo tanto, estas regiones deberían verse un poquito más frías. ¿Pero que tan poquito? También hay la posibilidad de que en estas regiones más densas se junten más fotones, porque ahí hay mayor fuerza de gravedad. En 1967 Reiner Sachs y Arthur Wolfe, e independientemente Martin Rees y Dennis Sciama encontraron que estas diferencias de temperatura necesariamente deberían existir si queríamos explicar la formación de estructuras en el Universo. Los resultados de sus investigaciones no fueron del todo exactos, pero hoy sabemos que estas inhomogeneidades de temperatura deben ser de cien milésimas de grado, algo demasiado pequeño para que la máquina de Penzias y Wilson lo pudiera detectar.

A finales de los años 70 la atención estaba concentrada en como resolver el problema de la formación de estructura o como observar las anisotropías de la radiación de fondo. Fue así que Brian Corey y David Wilkinson por un lado y un grupo liderado por un joven cosmólogo llamado Gerge Smoot, por el otro, se dieron a la tarea de observar estas anisotropías. El equipo de Smoot utilizó un avión U2 de la segunda guerra mundial adaptado por la NASA para fines científicos, para medirlas. A Smoot se le ocurrió que en

vez de medir la temperatura directamente, era mucho más sencillo medir las diferencias de temperatura y para esto desarrollo un aparato especial. James Peebles estimó ese aparato debía ser capaz también de medir las anisotropías causadas por el movimiento del Sol alrededor de la galaxia, o sea las anisotropías debidas a nuestro paso a través de esta radiación. Es como cuando nos metemos a una alberca y el agua está muy tranquila, si caminamos por la alberca agitamos el agua a lo largo de nuestro camino, provocando ondas de agua que se propagan en la dirección de nuestra marcha. Si queríamos medir las olas provocadas por el aire, tendríamos que restar primero las olas provocadas por nuestro paso a través de la alberca. Estas ondas son las que se propuso medir primero el equipo de George Smoot. Después de las mediciones, que fueron todo un éxito, anisotropías provenientes de nuestro movimiento por la radiación de fondo eran muy bien identificables, pero, ¡oh gran sorpresa!, en dirección contraria a la que se mueve el Sol alrededor de nuestra galaxia. No fue difícil darse cuenta que esto implicaba que toda la galaxia, es más, todas las galaxias de nuestro cúmulo local, se mueven conjuntamente hacia algún lugar común, es decir, esta anisotropía era más perceptible que el movimiento de la anisotropía formada por el movimiento del Sol alrededor de la galaxia. Este fue un descubrimiento notable, pero inesperado. Este resultado principalmente implicaba la existencia de una enorme cantidad de materia no visible que jala toda la materia del cúmulo local, como veremos más adelante, esta materia es llamada materia oscura y es uno de los misterios de la ciencia moderna.



Figura 10.

A principio de los años 90 la agencia espacial de EU, la NASA, lanzó un satélite (que también podemos llamar telescopio espacial) llamado Cosmic Background Explorer (COBE, por sus siglas en inglés) para finalmente poder observar la radiación del fondo cósmico. Un grupo de nuevo bajo el liderazgo de George Smoot, de la Universidad de California, en Berkeley USA, (en la Figura 10 a la derecha, en una imagen de 2007 durante la inauguración en el Colegio Nacional del Instituto Avanzado de Cosmología

(IAC) de México, junto con los fundadores de este), y de John Mather, de la NASA, el COBE llevó en su interior dos instrumentos nuevos, uno era el DMR que mide las diferencias de temperatura, ahora mejorado y el FIRAS para medir la distribución de la radiación que obtuvieran. El satélite fue lanzado en 1989 a 900 km de altura, en donde se puede evitar todo el ruido emanado por la tierra y su atmósfera. Después de casi dos años de observación, al fin los resultados fueron dados a conocer en la reunión de la American Physical Society en 1992, después de haber sido analizados y comprobados una y otra vez. El COBE midió con una precisión de una millonésima de grado la temperatura de esta radiación y encontró que efectivamente no era uniforme, sino que tenía unas pequeñas fluctuaciones, justo las suficiente para validar el modelo del Big Bang y para explicar la existencia de la estructura del universo, como se muestra en la Figura 11. En el año 2003 se volvieron a medir estas fluctuaciones con mucha mayor precisión y se enfocaron mucho mejor, esta vez utilizando un satélite llamado WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Map), llamado así en honor de David Wilkenson, quien murió justo después de haberse lanzado este satélite. Finalmente se demostró con estos resultados que estas fluctuaciones pueden explicar la formación de las galaxias, ya que las diferencias de temperatura se deben a fotones provenientes de regiones del Universo un poco más o un poco menos densas que el promedio. Como dijimos antes, esto es suficiente para comenzar el proceso auto-sostenido para la creación de objetos cósmicos con ayuda de la fuerza de gravedad. La medición de las fluctuaciones de la radiación del Universo son tan importantes para la cosmología y la ciencia que en 2009 fue lanzado un tercer satélite llamado Planck, en honor del científico alemán Max Planck, y éste midió las fluctuaciones de la radiación con aún mayor precisión para darnos nuevos datos sobre la polarización de la luz y otras cosas. Las mediciones del satélite COBE, y luego los de los satélites WMAP y Planck, permitieron el paso definitivo para convertir a la Cosmología en una ciencia de alta precisión, por estos resultados, George Smoot y John Mather recibieron el Premio Nobel de Física en el año 2006.

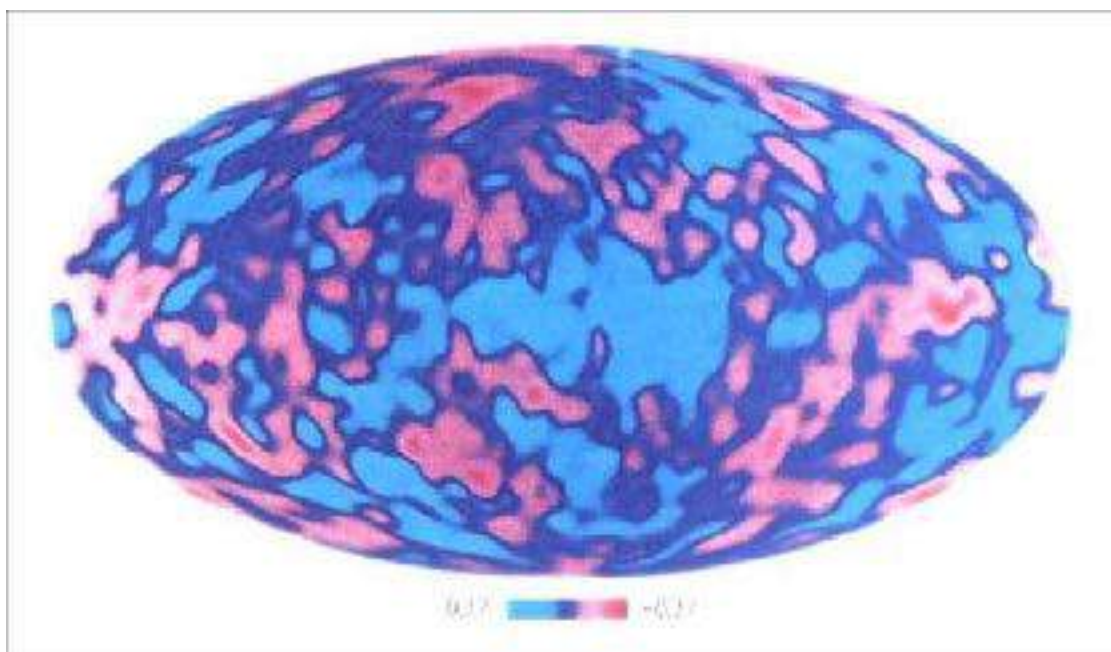


Figura 11.

La forma del espectro de la radiación esta dada por el tamaño de las fluctuaciones. Vamos a explicar este punto. Si nosotros pudiéramos viajar a la velocidad de la luz al otro lado de la galaxia, tardaríamos en llegar más o menos unos 60 mil años. Este tiempo es el

que ha pasado desde que los primeros hombres provenientes de Asia llegaron a América por el estrecho de Bering hasta nuestros días. Cuando se formó el Universo, todo se creó, así que a la interacción gravitacional también le tomo llegar hasta el otro lado de una galaxia una enorme cantidad de tiempo. Claro que en esa época todo estaba más cerca, pero también el Universo está en expansión, por eso las distancias se alargan constantemente cada vez más, y la luz y la gravedad requieren de tiempo para propagarse de un punto a otro. Para un cúmulo de muchas galaxias, esta propagación tardará mucho más tiempo, pues los cúmulos son de millones de años luz de tamaño y así sucesivamente para estructuras más grandes.

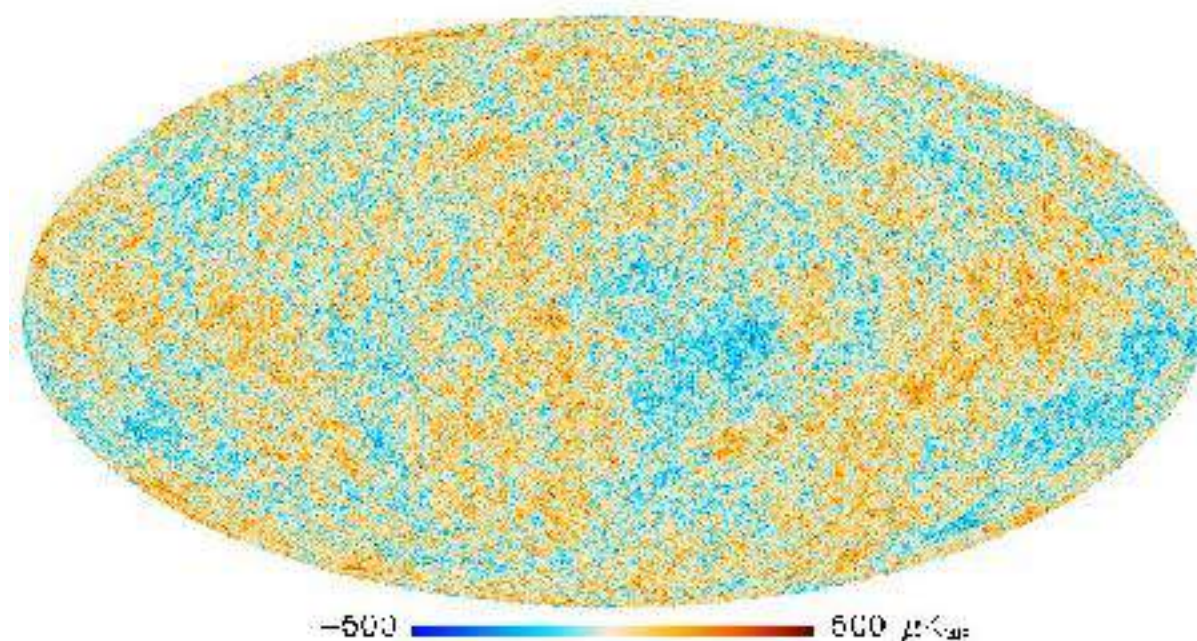


Figura 12

En la actualidad la radiación de fondo del universo se ha fotografiado con mejores técnicas, una foto actual es la Figura 12. Esta foto es la misma que la Figura 11, pero con muchísima más resolución, como cuando sacamos una foto de alguien que está lejos con una cámara barata y luego sacamos la misma foto con una cámara que tiene telefoto. Si comparamos esta foto con los modelos del universo emanados de la teoría general de la relatividad, la concordancia es increíble. En la figura 13 se muestra el resultado obtenido con el modelo de materia oscura fría, la línea verde, y los puntos son los obtenidos con la Figura 12. Vean como los puntos van completamente de acuerdo con la línea. Solo hay un pequeño problema, para que la línea adquiera esta forma, es necesario poner algo como 26% de materia atractiva que no se ve y como 68% de materia repulsiva, que tampoco se ve. A la primera se la llama materia oscura y a la segunda energía oscura. Tomen en cuenta que estos dos, materia y energía oscuras, son solo nombres, no representa en nada lo que realmente son, porque no sabemos nada de que son. Sin estas dos sustancias extrañas, la línea sería muy diferente en la Figura 13. Hay otras evidencias muy fuertes de la existencia de la materia y la energía oscuras, pero después de más de 30 años de sospechar su existencia y casi 20 de conocer su existencia, nadie sabe a ciencia cierta que son. Esto se considera uno de los más importantes misterios de la ciencia: ¿De qué está hecho el Universo?

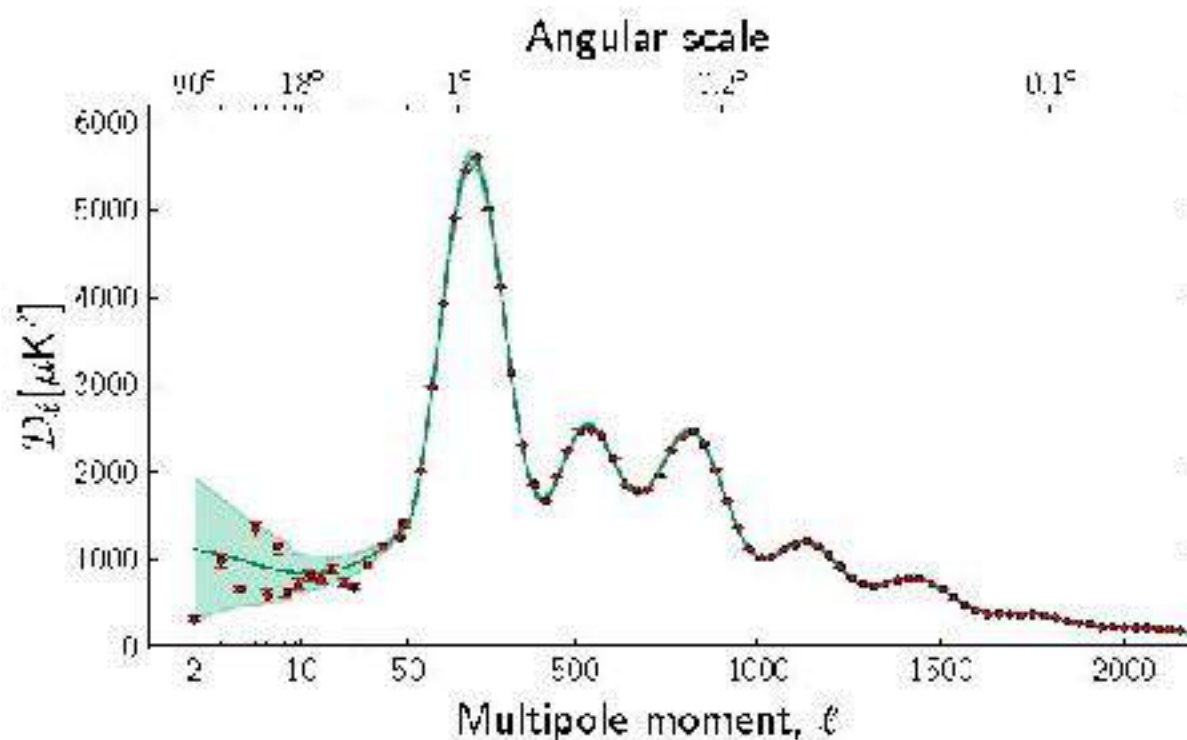


Figura 13.

Como ven, volvieron a surgir más preguntas: ¿por qué necesitamos poner materia que no interactúa con la radiación para ajustar las observaciones de la radiación de fondo con la teoría? ¿Existe realmente esta materia? ¿Qué es esta materia que no interactúa con la radiación? Estas preguntas las abordaremos en los próximos años. Por ahora, cerramos este mencionando que la Cosmología, gracias a los avances tecnológicos del siglo XX, se ganó limpiamente su lugar dentro de las ciencias empíricas de alta precisión, en las que la observación y la experimentación son indispensables para la validación de los modelos y las teorías.

Vamos a terminar este relato con el siguiente pensamiento. Hace unos de 500 años los seres humanos seguíamos pensando que la Tierra era plana y que éramos hechos a imagen y semejanza de Dios. Por eso creíamos que la Tierra era el centro del universo. Hace unos 400 años los seres humanos nos dimos cuenta de que la Tierra no era el centro del universo, sino que la Tierra gira alrededor del Sol. Unos años después reconocimos que el Sol era una más de las miles de estrellas que hay en el firmamento. A fines del siglo antepasado se identificó que todas las estrellas que veíamos pertenecen a una isla de estrellas que llamamos Galaxia. Y a principios del siglo anterior vimos que nuestra galaxia era una de miles de galaxias en el cosmos. Con esto vimos que nuestro universo se está expandiendo y por lo tanto tiene un origen y a finales del siglo que terminó, nos llegó la sorpresa de que ni siquiera estamos hecho de la misma materia que el cosmos. Nosotros estamos hechos de átomos cocinados en los centros de las estrellas y el cosmos es esencialmente materia y energía oscura, 96% de totalmente otra cosa. Pareciera que no somos nada en el universo. Sin embargo pensemos en lo que esto significa. Han tenido que pasar trece mil ochocientos millones de años, evolucionando en miles de trillones de kilómetros de espacio con cientos de miles de trillones de toneladas de materia, que siguiendo un conjunto de leyes simples se compactan para formar galaxias, para que en cada galaxia las fuerzas de gravedad las unan para formar estrellas y estas estrellas alumbren para que se formen planetas en donde intensas reacciones

químicas se lleven a cabo. Estas sustancias reaccionando químicamente evolucionaron hasta formar sustancias orgánicas y evolucionaron para formar células y después seres multicelulares. En muy pocos planetas estos seres multicelulares se desarrollaron tanto para formar animales, plantas, hongos, etc. Todo esto sucedió en trece mil ochocientos millones de años en el universo, para que en una galaxias normal, se dieran las condiciones en un planeta intrascendente de una estrella como cualquier otra, para que estos seres multicelulares pudieran adquirir conciencia, es decir, se preguntaran a sí mismos, ¿quien soy? ¿de donde vengo? ¿que hago aquí? ¿para que estoy aquí? Y se diera cuenta de que todo este espacio, todo este tiempo, toda esta materia evolucionó para que estos seres hechos de polvo de estrellas, parte del universo, hechos de universo, pudieran desarrollar ojos, oídos, cerebro. Estos ojos con los que el universo se ve a sí mismo, los oídos para que el cosmos se oiga a si mismo y cerebro para que el universo se conozca a sí mismo. Esto nos dice que somos producto del universo, nosotros somos el medio por el que el universo se está viendo, se está oyendo, se está conociendo a sí mismo. Y nosotros creemos que esto nos hace muy importantes en el universo.

Lecturas recomendadas:

¿De que está hecho el Universo? Materia Oscura y Energía Oscura.
Tonatiuh Matos. Fondo de cultura económico. Seria la ciencia para todos, no. 124.

La Radiación de Fondo del Universo. Tonatiuh Matos y Luis Ureña-López.
eBook de iTunes.