

EVOLUCIÓN DE LAS CONCEPCIONES DEL COSMOS **DURANTE EL SIGLO XX***

Julio Fernández
Departamento de Astronomía
Instituto de Física
Facultad de Ciencias

El tema a tratar en esta exposición es realmente un desafío, no solamente por la complejidad del mismo, sino también porque trataré de hacer una síntesis, en la cual presentaré sobre todo los puntos más relevantes.

I.- La transformación de las prácticas científicas

Antes de hablar de lo esencialmente astronómico, quisiera hacer referencia a lo que ha sido la evolución de la práctica científica dentro del campo astronómico, pero que en cierto sentido también compete a todas las demás ramas del conocimiento científico. La ciencia durante el siglo XX ha cambiado muchísimo en la manera como se lleva a cabo. Se ha pasado de una ciencia a la que se le podría llamar vocacional, como lo era hace un siglo, en donde los científicos eran personas más bien vocacionales, muy dedicadas y muy entusiastas, y que realizaban sus estudios con fondos propios (personas ricas) o gracias a mecenas; a una ciencia de fines del siglo XX institucionalizada, donde ya los científicos no son personas entusiastas, sino profesionales que trabajan dentro de instituciones universitarias o no (empresas u otras instituciones estatales), en grandes equipos. O sea que la ciencia ya no es una iniciativa personal, sino que ahora los emprendimientos científicos involucran a muchísima gente y son realizados por grupos de científicos.

Antes de comenzar a tratar los aspectos sociales de la ciencia y de la Astronomía en particular, quisiera hacer referencia a un trabajo que realicé, llamado "La colectivización de la ciencia: el caso de la Astronomía"¹. La palabra colectivización en este caso no se refiere al sentido socialista, sino a una tarea colectiva que realiza un grupo de gente para unir esfuerzos. En este trabajo se trata del tema de los costos crecientes de la investigación, hecho que se puede ver en el caso particular de la Astronomía, en una de las ramas de ésta que va a desarrollarse en el siglo XX, llamada la Radioastronomía que es el estudio del cosmos en la zona de radio del espectro electromagnético. El pionero en este campo fue el ingeniero electrónico norteamericano Karl Jansky, quien realizó el primer telescopio para captar ondas de radio, llamado radiotelescopio, y necesitó de una inversión de 1.000 dólares para instalar este equipo, o sea que lo pudo hacer en forma amateur con sus propios recursos.

Hoy en día uno de los grandes instrumentos para estudios de este tipo es el radiotelescopio de la Universidad de Cornell, que se encuentra en Arecibo, Puerto Rico. Este radiotelescopio tiene una antena de 300 metros de diámetro, que aprovecha una cavidad natural del terreno, y el costo de inversión de este equipo es de 150 millones de dólares. Eso demuestra que la ciencia traspasa lo que

* Versión corregida por el autor.

¹ Fernández, J.A. (1998). The transition from an individual science to a collective one: the case of astronomy. *Scientometrics* 42, 61-74.

puede ser el entusiasmo amateur de una persona, por más rica que esta sea; a menos que se piense en Bill Gates que destinará todo su dinero a llevar a cabo un proyecto, la mayoría de las personas requieren de un apoyo institucional para realizar una investigación.

Algunos jalones en la evolución social de la ciencia

Unos siglos atrás la ciencia estaba en manos de una elite muy pequeña, que generalmente eran sacerdotes o nobles. La ciencia se empieza a organizar recién a partir del siglo XVII, cuando se crean las primeras academias científicas, como la Academia dei Lincei en Italia o la Royal Society en Gran Bretaña. También corresponde al siglo XVII la creación de las primeras revistas científicas periódicas, como fue el caso de la Philosophical Transactions de la Royal Society, que aparece en el año 1662. Antes de esta fecha los trabajos científicos eran publicados por los autores en forma de libros, o sino a través de comunicaciones por carta con colegas que trabajaban en los mismos temas.

La primera ciencia que existió era una ciencia con poco impacto en el resto de la sociedad, constituía una parte de la Filosofía, la Filosofía natural. En el siglo XVIII se empieza a desarrollar la tecnología, en particular, la máquina de vapor que cambia las formas de producción; a continuación, la ciencia lentamente empieza a vincularse más al desarrollo tecnológico. Entonces paulatinamente empieza a cambiar el perfil de la ciencia. Durante el siglo XIX se asiste a un desarrollo creciente de la tecnología y a su asociación cada vez más estrecha con la ciencia.

Otro hito importante es que la ciencia, a partir del siglo XIX, ingresa en las universidades, como actividad curricular, creándose los primeros postgrados. Actualmente el desarrollo científico se entiende en gran medida como parte del trabajo universitario. En el caso del Uruguay esto es absolutamente cierto, porque un gran porcentaje de la investigación científica se realiza en la Universidad de la República. Pero en otras épocas no era así, y había una separación entre los investigadores y las universidades.

Entonces el siglo XX es testigo de una institucionalización, ya que la ciencia pasa a ser una actividad estratégica del estado, y los países desarrollados, en primer lugar, crean los consejos nacionales de investigación. Finalmente en las últimas décadas del siglo XX varios otros países también crean sus consejos de investigación, ciencia y tecnología.

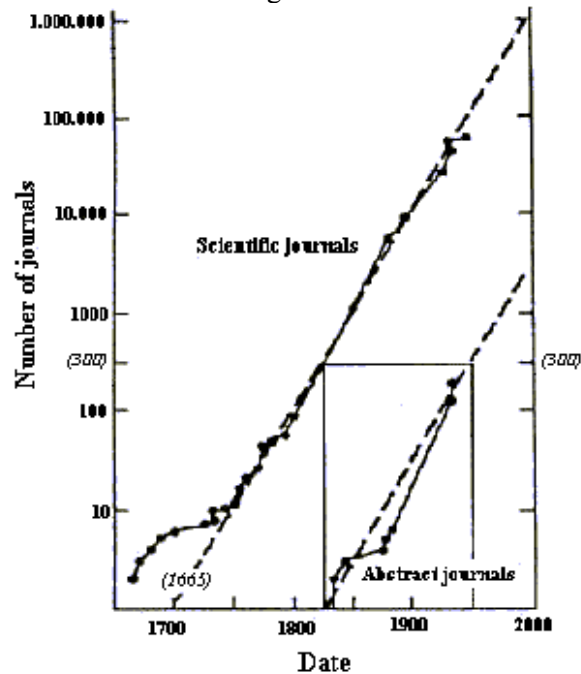
Se puede decir que, en líneas generales, durante la segunda mitad del siglo XX, la ciencia pierde su carácter de actividad primordialmente individual. A ello nos referimos específicamente a continuación.

La colectivización de la ciencia

Uno de los pioneros en la investigación sobre el aumento de la producción científica en los últimos siglos, en lo que se llama hacer ciencia sobre la propia ciencia, la disciplina que se denomina Ciencimetría, es Derek de Solla Price². Entre las investigaciones que él realizó, es interesante ver como el número de revistas científicas ha ido en aumento, desde la primera mencionada anteriormente aparecida en 1662, hasta la fecha final de este estudio, que corresponde al año 1960 aproximadamente. Se ve un incremento exponencial en el número de publicaciones a lo largo del tiempo (Fig. 1).

² Price, D.J. de Solla (1986). "Little Science, big Science... and Beyond", Columbia University Press, New York.

Figura 1

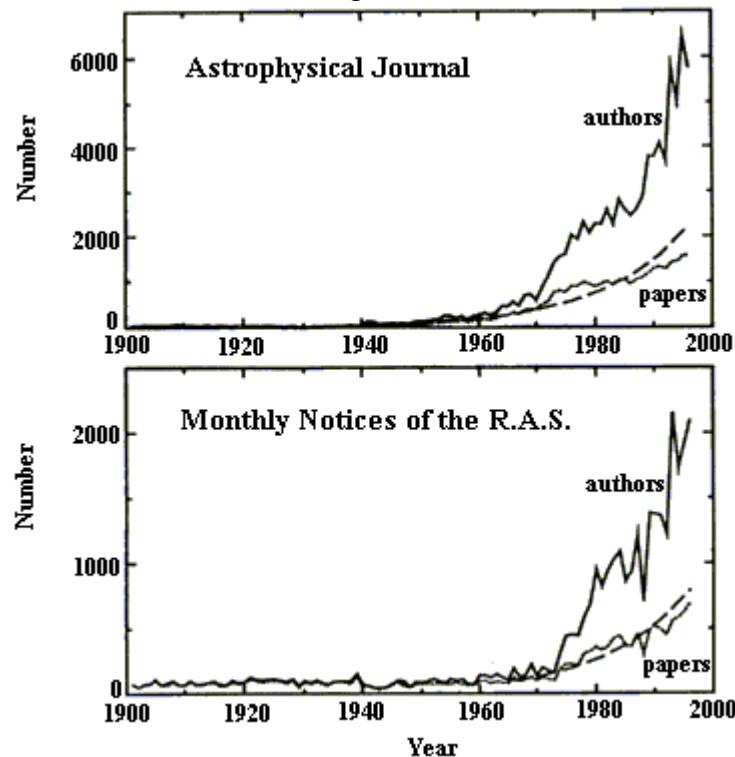


Esto se puede ejemplificar al observar las carátulas de los números de dos revistas científicas distintas en el área de la Astronomía, correspondientes a dos años diferentes, el *Astronomical Journal* que es una revista norteamericana y *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* que es una revista inglesa. La primera correspondiente al año 1952 y la segunda al año 1997. En el número de la *Astronomical Journal* del año 1952, la gran mayoría de los artículos publicados son de un solo autor, mientras que en el número de *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* de 1997, los artículos son generalmente de 4 a 6 autores y los artículos de 1 o 2 autores son excepcionales.

En mi trabajo antes mencionado "La colectivización de la ciencia", hice un estudio sobre dos revistas científicas en particular, que son bastante representativas de toda la Astronomía en el siglo XX. Una de ellas es una revista norteamericana llamada *Astrophysical Journal* y la otra es la revista inglesa ya mencionada, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. En cierta medida los grandes avances en Astronomía se han dado en estos dos países, a comienzos del siglo XX en Gran Bretaña y después en Estados Unidos. Por lo tanto estas revistas representan bastante bien la situación de la Astronomía durante el siglo XX. Lo que se ve en cada una de ellas es un aumento notable en el número de autores contribuyentes en los últimos 40 años. Esto demuestra que ha habido una incorporación masiva al campo científico, después de la Segunda Guerra Mundial.

Antes de la Segunda Guerra los descubrimientos científicos aumentaban, pero el número de personas vinculadas al quehacer científico se incrementaba muy lentamente; luego de ella se produjo un cambio abrupto y se dio un ingreso masivo de personas al trabajo científico. Esto se ve reflejado en un aumento exponencial del número de autores que participan en los trabajos publicados, en particular en estas dos revistas (Fig. 2).

Figura 2



El incremento en el número de autores es mucho mayor que el incremento de publicaciones. Lo que indica lo mencionado anteriormente, que el número promedio de autores por trabajo publicado aumentó muchísimo, se pasó de una media de aproximadamente 1 autor por trabajo publicado, a una media de 3 autores por trabajo publicado. Estos datos son para el caso particular de la Astronomía, pero se podría hacer extensivo este estudio para otras ramas del conocimiento y los resultados seguramente serían similares.

En forma muy sintética, se podrían indicar las siguientes causas del fenómeno que hemos denominado la colectivización de la ciencia:

1. la profesionalización de la actividad de investigación;
2. la presión por publicar;
3. el entrenamiento de los investigadores para trabajar dentro de un equipo;
4. la revolución en las comunicaciones;
5. la creciente complejidad de la ciencia.

Este cambio dramático que ha sufrido el trabajo científico, durante el último siglo y en particular en la última mitad del siglo XX, indudablemente tiene que ver con la importancia estratégica cada vez mayor que le dan los gobiernos, fundamentalmente de los países desarrollados, a la ciencia. Hay enormes inversiones destinadas a la ciencia, de parte de los gobiernos de estos últimos países; algunos dedican grandes recursos al rubro defensa, como es el caso de los Estados Unidos³. Hay grandes

³ La campaña contra el “terrorismo internacional” del gobierno. Bush elevó el presupuesto de defensa de los Estados Unidos para el año fiscal 2002 a niveles siderales de 370 mil millones de dólares. Una parte considerable de ese dinero va a proyectos militares de investigación y desarrollo, en particular el tan promocionado escudo antimisilístico.

inversiones en la ciencia también de las grandes empresas, porque saben que en el desarrollo científico están sus ventajas competitivas en el mercado.

II.- Las ideas astronómicas en 1900.

Todo este desarrollo de la ciencia ha contribuido a cambiar dramáticamente nuestra concepción del cosmos. Lo mostraremos comparando las ideas que predominaban en la astronomía a fines del siglo XIX – tema de esta sección – con las de cien años después, a las que nos referiremos en la siguiente sección.

El sol cerca del centro de la Vía Láctea (y de todo el universo conocido)

Dentro de las ideas fundamentales sobre el cosmos, hacia el año 1900, estaba la creencia de que el Sol se encontraba cerca del centro de la Vía Láctea. La Vía Láctea es nuestra galaxia, y se la denomina así porque si se observa el cielo, en una noche sin Luna y fuera de la luz de la ciudad, se ve una franja blancuzca que lo atraviesa de lado a lado. Esa franja blancuzca que en realidad aparece en el cielo como una nebulosidad, al observarla con un telescopio se ve que está compuesta por infinidad de estrellas, y atraviesa todo el cielo porque la Tierra se encuentra dentro de ella. Esta estructura es lo que se llama una galaxia y por su aspecto se le dio el nombre de Vía Láctea.

En el año 1900 se cometió el mismo error de pensar en una posición privilegiada del ser humano con respecto al resto del universo. Como desde la Tierra puede verse a la Vía Láctea en todo el cielo y en todas direcciones, como si nos envolviera, entonces se pensó que ésta se encontraba cerca del centro del universo. Además, como no se tenía información sobre la existencia de otras galaxias, también se pensaba que era prácticamente la única materia del universo, lo que afirmaba la suposición de que nosotros estábamos cerca del centro del universo. Quiere decir entonces que en esta época la concepción que se tenía sobre el cosmos era aún una concepción copernicana, heliocéntrica del cosmos, o sea que el Sistema solar estaba ubicado cerca del centro del universo. Por lo tanto desde la época de Copérnico en el año 1540, hasta el año 1900, la concepción que el hombre tenía sobre el cosmos no había cambiado demasiado.

Nebulosas espirales y elípticas: ¿sistemas solares en formación?

En el cielo se habían observado, al telescopio, unas pequeñas manchas blancuzcas que recibieron el nombre de nebulosas, que al utilizar un mayor aumento aparecían en formas espirales o elípticas. Esas nebulosas, conocidas desde el siglo XVIII, todavía no tenían, en el año 1900, una explicación muy clara de lo que podían ser, y algunos científicos pensaban que se debían a sistemas solares en formación.

La edad de la Tierra (y del sistema solar): alrededor de 500 millones de años

En ese mismo año ya no se tenía la concepción bíblica de que la Tierra tenía unos 6.000 años de antigüedad, pero sin embargo tampoco se había podido precisar bien cuál era la edad de la misma y del universo en su conjunto. Los estudios más firmes en cuanto a cuál podía ser la edad de la Tierra no venían del campo astronómico, sino del biológico y el paleontológico. La Teoría de la evolución de

Darwin, decía que la evolución de las especies requería muchísimo tiempo para producirse. Se estimaba que la edad del universo podía ser aproximada a unos 500 millones de años.

Generación de energía en el Sol y en las estrellas: ¿contracción gravitacional?

Un gran problema, en aquella época, era la forma como se podía generar la energía en el Sol y en las estrellas. Faltaba todavía la contribución de la Física en ese momento, como para entender la generación de energía, o sea cómo el Sol podía estar emitiendo tanta energía al espacio por un tiempo muy grande.

La base física que había era limitada, las ramas de la Física que estaban desarrolladas y se podían utilizar para interpretar el cosmos eran la Física clásica, la Mecánica de Newton, el Electromagnetismo y la Termodinámica. También hay que resaltar que en 1900 sólo se conocían dos de las fuerzas de la naturaleza que hoy conocemos, que eran la fuerza gravitacional y el electromagnetismo. Las técnicas observacionales eran los telescopios, la fotografía y el espectroscopio que se había empezado a usar en Astronomía unos 40 años antes, alrededor del año 1860. El espectroscopio es un instrumento que se utiliza para analizar el espectro de luz del objeto en cuestión. Las líneas espectrales permiten, entre otras cosas, identificar la naturaleza química de los elementos que componen el astro. Estas eran pues las herramientas teóricas y observacionales con las que se contaba.

Para explicar el enigma de la energía producida por el Sol, lo que estaba más a mano era la energía proveniente de la propia contracción gravitacional. Al contraerse la estrella, se produce energía potencial gravitatoria y aumenta la energía cinética de las moléculas gaseosas, la fricción de éstas produce calor que se libera. Ese mecanismo de liberación de energía puede funcionar mientras la estrella se contrae y por lo tanto no es adecuado para tiempos de vida muy largos.

La constitución química del universo: los mismos elementos que en la Tierra

En los inicios del siglo XX ya se había podido determinar, gracias al estudio espectroscópico, que en el universo existían los mismos elementos que en la Tierra. Esto fue un gran adelanto, porque 60 años antes todavía se afirmaba que, entre las cosas que estaban vedadas al conocimiento humano, una de ellas era saber la constitución química de los cuerpos celestes. Esta situación cambió radicalmente cuando se utilizó el análisis espectral, para el estudio de la composición química de los astros. Sin embargo, en 1900 no se conocía las proporciones en que cada elemento está presente en el universo.

La unidad más pequeña de la materia

En cuanto a la constitución de la materia hay que señalar que el átomo era la unidad más pequeña de la materia cuya existencia se reconocía hacia fines del siglo XIX. En 1900 recién se acababa de descubrir el electrón.

El sistema solar, su origen y la existencia de otros sistemas planetarios

Con respecto al Sistema solar, también había ideas que han cambiado a lo largo del tiempo. Se pensaba que el origen del Sistema solar se produjo por el encuentro del Sol con una estrella intrusa, que

había generado una enorme marea en el Sol. Esa enorme marea provocó el desprendimiento de materia, de la cual se formaron los planetas.

Uno de los problemas de esta teoría es que encuentros cercanos entre dos estrellas, como para producir ese tipo de marea solar, son de una probabilidad extremadamente baja. Eso llevaba a considerar que los sistemas planetarios eran algo rarísimo en el universo, algo excepcional, lo cual también tenía repercusiones sobre la forma en que se veía el problema de la existencia de vida en el universo. Si se piensa que una de las condiciones para sustentar la vida es que se requieren planetas, esta teoría llevaba a concluir que los sistemas planetarios, y por ende la vida, eran un acontecimiento excepcional en el universo.

Los planetas

Se pensaba que los planetas vecinos a la Tierra eran similares a esta, o sea que podían ser habitables y habitados. En el caso de Marte había muchos astrónomos que pensaban que el planeta estaba habitado. Existía la teoría de los canales marcianos, que ahora es una leyenda, pero a comienzos del siglo XX era algo que se veía con mucha seriedad. Esta teoría afirmaba la existencia de un sistema de canales hechos por una civilización, con la finalidad de transportar agua desde los casquetes polares hasta las zonas de baja latitud. Los planetas extrasolares en ese momento eran desconocidos, o sea que los únicos planetas conocidos eran los del Sistema solar, con la excepción de Plutón que se descubrió en el año 1930.

Habiendo resumido el panorama de las ideas astronómicas a comienzos del siglo XX, intentaremos mostrar a continuación en qué medida esas ideas han cambiado a fines del mismo siglo.

II.- Las ideas en 1999

Empecemos por comparar las teorías y las técnicas disponibles.

Fundamentos teóricos y técnicas observacionales

Los cimientos teóricos de la comprensión científica del universo hacia 1900 eran esencialmente, según ya se destacó, la mecánica newtoniana, el electromagnetismo, la termodinámica; se conocían, como fuerzas básicas de la naturaleza, la gravedad y las interacciones electromagnéticas. En 1999, se disponía, adicionalmente, de la teoría de la relatividad, de la mecánica cuántica, de la mecánica estadística, de la física nuclear y de una amplia gama de partículas subatómicas; además de las fuerzas de la gravitación y del electromagnetismo, se conocían otras dos fuerzas de la naturaleza: la interacción fuerte y la interacción débil.

Los principales instrumentos para efectuar observaciones eran, a comienzos del siglo XX, los telescopios con cámaras fotográficas y los espectroscopios. A fines del siglo, se usan telescopios con cámaras CCD y espectroscopios, radiotelescopios, satélites y sondas interplanetarias.

Las técnicas observacionales son, a fines del siglo XX, mucho más sofisticadas. Los telescopios han crecido en tamaño. El telescopio más grande, en el año 1900, tenía un objetivo (pieza que recoge la luz) con diámetro de 1 m, ahora el objetivo con diámetro más grande es de 10 m, o sea que se ha

multiplicado el área colectora por un factor de 100. El desarrollo de la electrónica permite utilizar detectores más eficientes, en 1900 se usaban placas fotográficas y ahora se utilizan cámaras electrónicas denominadas CCD (sigla de Charged Couple Device), que son similares a cámaras de video. Por lo tanto toda la información se digitaliza, ya nadie está mirando a través del telescopio o tomando notas, sino que ahora la imagen que se observa se recoge con esos detectores y pasa a la computadora, es una imagen digitalizada y los astrónomos trabajan cómodamente sentados frente a la computadora.

Se ha agregado nuevo instrumental. En 1900 toda la información que venía del cosmos era la obtenida en el rango óptico, en cambio ahora prácticamente se estudia el cosmos en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético. La Radioastronomía se ocupa del rango de ondas de radio. Mediante satélites artificiales se han colocado instrumentos fuera de la atmósfera terrestre y con ellos se pueden estudiar variaciones que no llegan a la superficie terrestre, porque la atmósfera las bloquea, como por ejemplo los rayos X, rayos ultravioletas y gran parte de las ondas infrarrojas. Quiere decir que ahora se pueden observar los cuerpos celestes en todo el espectro electromagnético y así tener una idea mucho más precisa de los fenómenos que allí ocurren, y de la naturaleza física de esos objetos. También se han hecho estudios *in situ* de los diversos objetos del Sistema solar mediante sondas interplanetarias. Este tipo de estudios *in situ*, en los que no se utilizan los medios astronómicos clásicos, han mejorado notoriamente el conocimiento sobre este sistema.

Un universo en expansión sin centro privilegiado

Nos hemos trasladado pues al año 1999, donde el Sol ya dejó de ser el centro del universo. Ahora se habla de un universo en expansión, que no tiene centro privilegiado. En lo que concierne al Sistema solar, éste ya no se encuentra en el centro de la Vía Láctea, sino que se ubica más bien en uno de sus bordes. O sea que otra vez el sentido común volvió a fallar, como había pasado muchas veces antes, y el hecho de que veamos que estamos rodeados de estrellas de la Vía Láctea no significa que estemos exactamente en su centro.

Las nebulosas: galaxias como la Vía Láctea

Lo notable es que se ha podido dilucidar la naturaleza de esas nebulosas en forma espiral y elíptica que se ven en el cielo. Finalmente se entendió que no eran sistemas planetarios en formación, sino que eran otras galaxias del mismo tipo que la Vía Láctea. En realidad, son enormes conglomerados de miles hasta decenas, o cientos de miles de millones de estrellas, que se ven como nebulosidades por la enorme distancia a la que se encuentran de nosotros. Entonces el universo aumentó muchísimo en extensión, porque ya no se hablaba de una sola galaxia, sino de miles de millones de galaxias.

Edad de la Tierra (y del sistema solar): unos 4.600 millones de años

No sólo aumentó el universo en extensión, sino también en tiempo de existencia. Los 500 millones de años que se estimaban en el año 1900, pasaron a ser ahora, para el caso del Sistema solar, unos 4.600 millones de años, y para el universo en su conjunto alrededor de 10.000 a 20.000 millones de años.

En lo que se refiere al Sistema solar, apareció un método de datación desconocido todavía en el año 1900. Este método de datación utiliza el decaimiento radiactivo de ciertos isótopos. Vamos a caracterizarlo en pocas palabras. Las rocas contienen isótopos radiactivos, los que son núcleos inestables, que decaen a otros núcleos estables, liberando distintos tipos de partículas, como por ejemplo electrones. Entre los isótopos inestables más abundantes, se encuentran el uranio 238 y el uranio 235, que decaen en plomo, también está el caso del potasio 40. La vida media de esos isótopos es muy larga, de aproximadamente miles de millones de años, y lo que se hace es medir en la roca cuanta cantidad de isótopo radiactivo hay y cuanto ya se ha convertido en el isótopo hijo estable. Por ejemplo, en el caso del uranio, debe medirse cuanta cantidad del isótopo 235 o 238, pasó a convertirse en núcleos atómicos de plomo. Entonces, de acuerdo a la cantidad de uno u otro, se sabe si la roca es más o menos vieja. Cuando se forma la roca, lo hace con determinado contenido de los isótopos radiactivos. O sea que estos isótopos son como un reloj de arena: si hay más cantidad del isótopo con el número atómico inestable la roca es más joven, si hay menos cantidad de este mismo isótopo la roca es más vieja.

Utilizando este procedimiento, se han determinado las edades de las rocas más antiguas de las que se dispone en la Tierra, que en realidad no son rocas terrestres, sino que se trata de meteoritos. Hay que tener en cuenta que la corteza terrestre está en continua evolución, entonces las rocas son mucho más jóvenes que la edad real de la Tierra y del resto del Sistema solar. Las edades más antiguas que se obtienen, de rocas terrestres, son de 3.900 millones de años. Si estas rocas no hubieran sido alteradas por ningún proceso, tendrían la edad de 4.600 millones de años, pero cuando las rocas son alteradas, en ese momento se vuelve a punto cero en el tiempo. La edad del Sistema solar es de 4.600 millones de años pero esa es apenas la tercera o la cuarta parte de la edad del universo.

Generación de energía en el Sol y en las estrellas: reacciones de fusión termonuclear

En cuanto al tema de la generación de energía por el Sol y las estrellas, también cambiaron radicalmente las ideas. En el siglo XX aparece una fuente de energía que explica bien el mecanismo de generación de tanta cantidad de energía y por tanto tiempo. Este mecanismo de generación de energía se basa en las reacciones de fusión termonuclear. Todo esto fue posible gracias al avance de la Física, por lo que en el año 1900 no se hubiera podido llegar a descubrir esta fuente de energía, porque no se tenían las herramientas físicas para interpretarla correctamente. Ya no se dispone sólo de la Física clásica, sino que – según se anotó más arriba - se incorporan la teoría de la relatividad, la Mecánica cuántica, que tiene que ver con la forma en que funciona la materia en su aspecto más íntimo, la Mecánica estadística, la Física nuclear y de partículas.

Hasta entonces sólo se conocía el átomo como unidad más elemental de la materia y recién se había descubierto el electrón, ahora existe todo un micromundo tan vasto como el macromundo. Se conoce toda una estructura del átomo con su núcleo, donde se encuentran los protones y neutrones, y el enjambre de electrones rodeando a este núcleo. De ahí en más se llegó a elaborar con más detalle el conocimiento de las subpartículas, o sea que la unidad más pequeña ya no son los nucleones que corresponden a protones y neutrones, sino que ahora son los quarks. Además de la fuerza de la gravedad y la electromagnética se agregan dos nuevas fuerzas, que son las interacciones fuertes y débiles. Las interacciones fuertes tienen que ver con las fuerzas que mantienen a los nucleones unidos dentro del núcleo atómico, y las interacciones débiles están relacionadas con el decaimiento radiactivo, al que ya se ha hecho referencia.

Así, la generación de energía en el Sol y las estrellas pudo tener una explicación satisfactoria, mediante el proceso de reacciones de fusión termonuclear. Lo que ocurre en esas reacciones es que núcleos atómicos de hidrógeno (el hidrógeno es el elemento más abundante en el Sol y las estrellas) se fusionan para formar núcleos atómicos de helio. El núcleo atómico de helio tiene una masa un poco menor que la masa correspondiente a la combinación de los cuatro núcleos atómicos de hidrógeno. ¿Qué sucede con esa diferencia de masa? ¿Se pierde? Aquí entra a jugar el Principio de equivalencia de la masa y la energía, formulado por Einstein. Esa masa, que se perdió en el pasaje de cuatro núcleos atómicos de hidrógeno a uno de helio, se convirtió en energía. El Principio de equivalencia señala que la energía es igual a la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz, y como el cuadrado de la velocidad de la luz es un número enorme, quiere decir que pequeñísimas cantidades de materia que se pierden, generan enormes cantidades de energía. Así puede explicarse que se liberen enormes cantidades de energía a partir de poca pérdida de masa, y que una estrella pueda continuar funcionando por tiempos muy largos, de varios miles de millones de años, hasta que todo el hidrógeno en el núcleo del Sol se convierta en helio.

El requisito para que se produzcan reacciones termonucleares es que haya temperaturas muy altas, para que los nucleones en los encuentros puedan vencer la fuerza de repulsión eléctrica, porque son cargas del mismo signo. Estas elevadas temperaturas son justamente las que se dan en el interior del Sol y las estrellas, y andan en un rango de los millones o decenas de millones de grados centígrados. La temperatura proviene inicialmente del colapso gravitacional de las estrellas. La idea, en el año 1900, era que la fuente de energía provenía del colapso gravitacional, y esta idea no era físicamente errada, pero sí insuficiente, porque en realidad la primera fuente de energía que tienen el Sol y las estrellas, proviene del colapso gravitacional. La estrella se calienta con este colapso y al adquirir temperaturas altas en las zonas centrales, comienza a generar energía termonuclear.

El Sistema solar: su origen

Con respecto al Sistema solar, se desechó la teoría del encuentro con una estrella intrusa, para explicar su origen. Ahora se piensa que el Sol y los planetas se formaron a partir de la contracción gravitacional de una nube interestelar de polvo y gas. En esta concepción, los planetas son un subproducto de la formación del propio Sol. La existencia de planetas sería el resultado natural de la formación de las propias estrellas, por lo tanto los planetas pueden ser muy abundantes en el universo.

El conocimiento de los planetas y el estudio de los cambios globales

Con relación a los conocimientos sobre los planetas del Sistema solar, a sus condiciones climáticas y a la posibilidad de vida en ellos, eso ha cambiado bastante. Se sabe, gracias a la Radioastronomía, que Venus es inhabitable. La temperatura superficial en este planeta es de 500° C. A partir de esta comprobación, los científicos empezaron a preocuparse por los cambios globales climáticos de la Tierra, porque Venus, que se consideraba casi como el planeta gemelo de la Tierra, en realidad tenía un clima tan diferente. Con pequeños cambios en los parámetros físicos, ese planeta ha evolucionado en algo totalmente distinto y la gente entonces empezó a ver que tal vez eso le podía ocurrir a la Tierra. El estudio de Venus ha sido una de las causas de la preocupación por los cambios globales en el clima terrestre.

Con respecto a la existencia de vida, la idea actual es que Venus nunca transitó por una fase de clima benévolo, siempre tuvo un clima acorde a su atmósfera densa, que es la responsable de esa

temperatura tan alta en su superficie, así como también debe sumarse una mayor radiación solar que la que recibe la Tierra, pues recibe aproximadamente el doble que la Tierra por su menor distancia al Sol. El dióxido de carbono es el gas principal en la atmósfera de Venus; cuando se encuentra en altas densidades provoca un fuerte efecto de invernadero. En las zonas de nubes la temperatura baja a 0° C, porque estas reflejan bien la luz, y esto llevó a confundir a los astrónomos antiguos, respecto a las condiciones del clima en este planeta.

También en la Tierra existe un perfil variable de temperatura, por ejemplo a 10 Km de altura la temperatura es de - 40° C. A Venus se lo considera un planeta gemelo a la Tierra, porque ambos son similares en tamaño y masa. Tiene un campo magnético más débil que el terrestre, tiene volcanes pero no se sabe si están activos o no, tampoco se sabe si existe una tectónica de placas. La Tierra tuvo mucho anhídrido carbónico en su atmósfera al comienzo, pero el agua líquida de los océanos permitió que éste se disolviera y liberó a la atmósfera de esa enorme cantidad de anhídrido carbónico. Pero el agua nunca llegó a condensar en Venus, quedó siempre como vapor de agua, y no hubo manera de fijar el anhídrido carbónico en la superficie.

En el caso de Marte, también han cambiado bastante las ideas a lo largo del siglo. Los canales de los que se hablaba a comienzos de siglo, se vio que eran una ilusión óptica. Los científicos a veces, llevados por su pasión, pueden ver lo que realmente quieren ver. Estos canales resultaron ser marcas de accidentes naturales en la superficie de Marte, que a gran distancia se veían como canales, como un entrecruzado de estructuras lineales. Esto se dilucidó recién en la era espacial cuando la primera sonda espacial llegó a Marte, se vio que realmente las condiciones en este planeta eran totalmente distintas de cómo se pensaba. O sea que Marte realmente es un planeta muy inhóspito, su atmósfera es tenue, su superficie está llena de cráteres como la Luna, y eso llevó a plantear la idea de que un planeta así no podía tener vida. Pero con las sondas espaciales siguientes que se enviaron a Marte, después del año 1964, se empezaron a ver rasgos distintos, que lo colocaban en una transición entre la Luna y nuestro planeta. Se empezaron a ver huellas de ríos que estaban secos, pero que indicaban que en algún momento había habido agua líquida en este planeta. Entonces fue así que se quiso hacer una prueba decisiva en el año 1976, cuando se enviaron las sondas Viking 1 y 2 a Marte. Estas sondas tenían dos módulos de descenso, con la finalidad de extraer muestras del terreno y de analizarlas, para tratar de detectar la presencia de microorganismos. Los resultados de esos experimentos fueron negativos, lo cual pareció poner punto final al tema de la vida en este planeta.

El tema quedó en un segundo plano hasta que, en el año 1996, cuando cayó un meteorito proveniente de Marte en la Tierra, se volvió a abrir nuevamente el debate. Para que un meteorito proveniente de Marte caiga en la Tierra, tienen que suceder varios acontecimientos encadenados. Primero debe producirse el choque de un asteroide contra la superficie de Marte. Este asteroide debe ser grande, para generar una colisión violenta con liberación de mucha energía, lo que resulta en la eyección de fragmentos, algunos de los cuales pueden alcanzar tal velocidad, que supere la velocidad de escape del planeta. Esos fragmentos que escapan del planeta empiezan a circular alrededor del Sol y sus órbitas van evolucionando, hasta que eventualmente alguno de ellos queda en una órbita que cruza la de la Tierra. Allí se produce el encuentro y eventualmente el choque, entre el fragmento y nuestro planeta. Todos estos hechos se tienen que dar encadenados, cosa que a veces sucede, porque en una colisión grande se liberan millones de fragmentos por lo cual, si bien la probabilidad de que pasen todos estos hechos es muy baja, al considerarse millones de fragmentos, con alguno de ellos puede ocurrir una colisión con la Tierra.

La identificación de que ese meteorito que cayó en la Tierra era de Marte, provino de un estudio de abundancias isotópicas del oxígeno. Este elemento tiene 3 isótopos: el oxígeno 16, 17 y 18. Lo que se

comparó fueron las abundancias de esos isótopos del oxígeno, con las abundancias que encontró la sonda Viking cuando analizó el terreno de Marte y se dio un ajuste perfecto. Ahora la cuestión de la vida en Marte está en discusión, no se habla de hombrecitos verdes con antenas, sino de vida microbiana. Habrá que seguir investigando, porque lo que ahora sí se sabe es que el clima de Marte fue muy benévolo en los comienzos de la vida del planeta. Hace 4.000 millones de años, tenía una atmósfera más densa, había ríos, tal vez océanos. Luego el clima se hizo más extremo, se secó el planeta, pero durante el tiempo que tuvo el clima benévolo pudo haber surgido la vida, y quedar en la actualidad organismos fósiles. También la vida pudo haberse refugiado en las profundidades del planeta, porque un problema es que la corteza de Marte está sujeta a las radiaciones ultravioletas solares y a los rayos cósmicos, que son letales para ella. Quiere decir que la vida, si existe, tiene que estar en refugios subterráneos, no expuesta a la superficie. Ahora existe un programa de lanzar misiones a Marte cada 2 años, o sea cada vez que se produce un acercamiento de Marte a la Tierra, y la idea es que dentro de 5 años se lance una sonda que tome muestras del terreno y las traiga a la Tierra, para que sean analizadas aquí mismo.

Los planetas extrasolares

Una de las últimas conquistas de la Astronomía es el descubrimiento de planetas extrasolares, o sea planetas girando alrededor de otras estrellas que no son el Sol. Estos eran desconocidos hasta hace 10 años atrás, y en este momento hay una docena de ellos que son planetas de gran tamaño.

El descubrimiento de planetas extrasolares es dificultoso, porque una estrella es un objeto grande y luminoso y un planeta es un objeto chico y frío, entonces hay que descubrir un objeto chico y frío frente a uno que es millones de veces más luminoso y está muy cercano. De hecho esto no puede hacerse por medio de una imagen directa, no se puede ver a un planeta al lado de una estrella. Hay que usar métodos indirectos, espectroscópicos. Lo que se trata de explotar son las perturbaciones gravitacionales que causa el planeta sobre el movimiento de la estrella, y basándose en eso detectar la existencia de ese planeta.

El lugar del Sol dentro de la Vía Láctea

La Vía Láctea tiene un movimiento de rotación, es un sistema muy dinámico. En pequeña escala se la puede imaginar como un remolino que se forma en la superficie del agua y la espuma empieza a girar y se ve una forma de disco en el remolino; con la galaxia sucede lo mismo. La galaxia evoluciona y es un sistema dinámico que cambia con el tiempo. La forma de disco aplanado de las galaxias depende de la masa y de la rotación, de lo que se llama momento angular.

La posición del Sol es cercana a los brazos espirales y bastante alejada del núcleo de la galaxia, que es donde se encuentra la mayoría de las estrellas. El número total de estrellas en nuestra galaxia es de unos 100.000 millones. Al observar a la Vía Láctea de perfil, se presenta como un sistema bastante achatado con la concentración mayor de materia cercana al núcleo. Tiene conglomerados de cientos de miles de estrellas arracimados, que se llaman cúmulos globulares y fueron los primeros objetos que se formaron. La galaxia se formó a partir de materia gaseosa que colapsó, constituyendo los cúmulos globulares y dando esa forma esférica. Fueron justamente estos cúmulos globulares los que permitieron determinar que nosotros nos encontramos en una posición asimétrica, lejos del centro.

¿Cómo desde dentro de la galaxia podemos saber en qué posición estamos? A uno de los grandes astrónomos del siglo XX, Harold Shapley, un astrónomo norteamericano, se le ocurrió ver cómo era la ubicación del Sistema solar respecto a la de los cúmulos globulares en el espacio. Basándose en la distancia y la dirección pudo determinar exactamente cómo se ubica el Sistema solar, respecto al conjunto de estos cúmulos globulares y darse cuenta de que nuestro Sistema solar está en una posición asimétrica respecto a ellos; razonó correctamente que los cúmulos globulares debían estar distribuidos en forma más o menos simétrica en torno al centro de la galaxia. Por lo tanto, si el Sistema solar está ubicado hacia un costado de los cúmulos globulares, también debe estar ubicado hacia un costado de la galaxia. Luego, cuando se instauran otros métodos para estudiar la posición del Sistema solar, se corrobora que eso es realmente así, pero ese fue el primer indicio de que nuestro Sol no ocupaba la posición central.

Antes de llamarse galaxias y de determinarse que eran un conglomerado de estrellas, se les llamaba nebulosas (la palabra nebulosa en latín significa borroso). Las galaxias que se ven mejor a simple vista en nuestro cielo, son las nubes de Magallanes, para las demás se necesita un telescopio. Como por ejemplo la galaxia Andrómeda, que a veces se puede ver a simple vista, pero generalmente se necesita un telescopio.

Sobre el origen y la evolución del universo

Uno de los grandes debates en Astronomía fue el de la verdadera naturaleza de las nebulosas, y se llegó a resolver cuando se determinó que eran galaxias como la nuestra. Esta determinación fue hecha porque existen estrellas que pasan repentinamente por una explosión y aumentan su brillo. Estas se clasifican en dos categorías: las novas que son las menos violentas y las supernovas que son más violentas. Se empezaron a ver cerca de estas nebulosas, la ocurrencia de novas, que generalmente son las más frecuentes. Entonces, si ocurrían las novas, no podían ser sistemas planetarios en formación, o sea que tenía que ser una estrella que se encontraba en ese lugar, demasiado débil para ser observada antes de la explosión. Cuando se observa una estrella se obtiene el brillo aparente y por otro lado existe una idea del brillo real, con estas dos medidas se calcula la distancia a la que se encuentra de la Tierra, y a su vez se tiene una idea de las dimensiones del objeto que se está observando. Para el caso de las nebulosas se veían dimensiones correspondientes a galaxias.

El astrónomo Edwin Hubble, en los años 1920, se dedicó a estudiar las velocidades de esas galaxias. Para ello utilizaba un efecto que está vinculado a la velocidad de acercamiento o alejamiento del objeto, que es el efecto Doppler: si el objeto se acerca, las líneas espectrales tendrán un corrimiento hacia el azul y si el objeto se aleja las líneas espectrales sufrirán un corrimiento hacia el rojo. Hubble se dedicó a estudiar la luz de las galaxias y comprobó que casi todas ellas tenían un corrimiento hacia el rojo, lo que indicaba que se estaban alejando de nosotros (salvo las más cercanas). La interpretación de esto es que el universo está en expansión. Esta es la base de la teoría cosmológica actual, o sea que se habla de un universo en expansión y si se estudiara este universo en el pasado tendría que tener dimensiones menores a las actuales. No existe un centro en el universo, todo se está expandiendo con respecto a todo lo demás. Habría una correlación entre la distancia y la velocidad de alejamiento. Cuanto más alejado esté un objeto de nosotros, mayor va a ser la velocidad de alejamiento. Existen preguntas sin responder: ¿El universo es finito o infinito?, ¿existe sólo este universo o hay otros universos?

Basándose en la teoría de la expansión, si se hiciera una extrapolación hacia el pasado, se llegaría a la conclusión de que la materia estaba más concentrada, y podría llegarse a un momento en el tiempo

en el cual la concentración de la materia sería tal, que no existirían las galaxias, y en otro punto más alejado en el tiempo la materia sería pura energía, hasta llegar a lo que sería el momento inicial de este proceso, que es lo que se llamó el gran estallido, el Big Bang. Esta es la interpretación estándar del origen y evolución del universo, si bien no es la única. Se ha planteado como modelo alternativo un universo estacionario, donde existe expansión pero a su vez se va agregando materia que se crea en ese momento, para mantener la densidad media constante. En general a los seres humanos nos gusta más, por nuestra misma estructura mental, pensar en ciclos. Sería mucho más agradable pensar que la expansión va a tener un momento en que se va a frenar y va a ser sustituida por una contracción. Como no se conoce toda la materia que hay en el universo, porque puede haber materia que no es luminosa y no está en forma de estrellas, entonces tampoco se puede saber si los modelos que predicen una expansión seguida de una contracción pueden funcionar. Para muchos de nosotros sería muy agradable pensar que no nos vamos a disipar en el infinito eternamente.

La constitución química del universo y la creación de los elementos

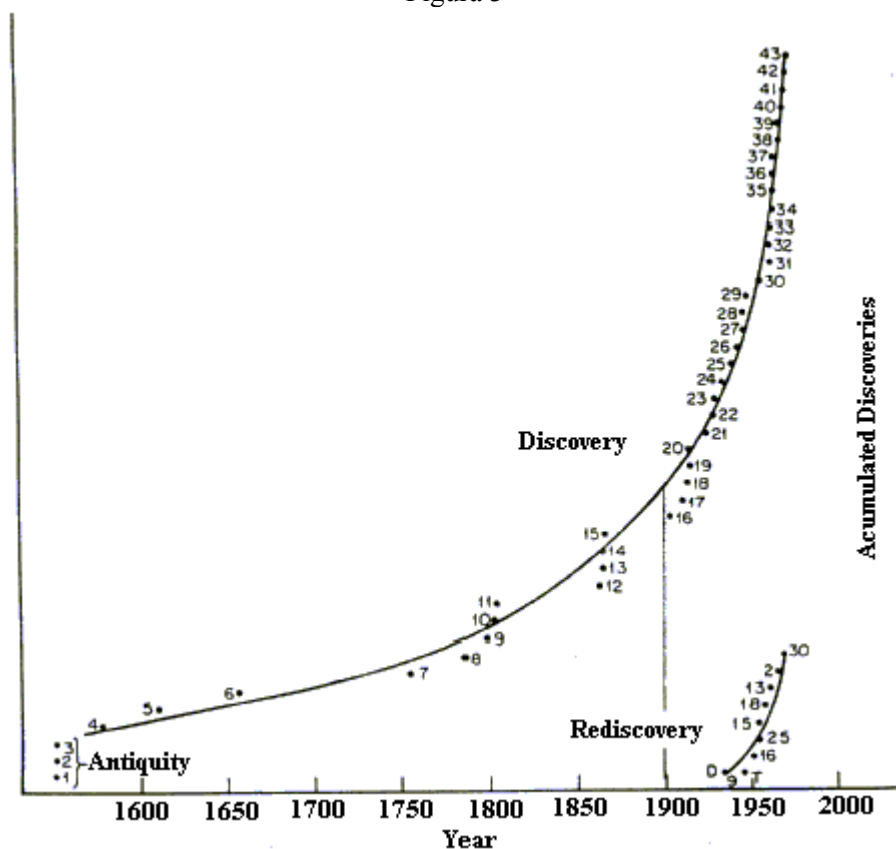
Como se señalaba anteriormente, en el año 1900 ya se tenía conocimiento de que en el universo existían los mismos elementos que en la Tierra; ahora se ha podido determinar y precisar mucho mejor el contenido químico del universo, y en particular las abundancias relativas de los elementos. Los elementos dominantes son los más livianos, como el hidrógeno y el helio.

En cuanto a la creación de los elementos, algunos tendrían un origen primordial que son los elementos más livianos (núcleos de deuterio, tritio, helio y el hidrógeno), mientras que los elementos más pesados se crearían por reacciones termonucleares en el interior de las estrellas. Quiere decir entonces que el universo en su evolución ha sido una fábrica de creación de elementos. Por lo que en el universo joven había poco carbono, hierro, sodio, calcio, uranio, etc., elementos que fueron procesados después a medida que las estrellas consumían el hidrógeno en sus núcleos, y se iba convirtiendo en helio y elementos más pesados. Los núcleos atómicos de helio se pueden fusionar para formar núcleos de carbono y así seguir toda la cadena. El hidrógeno y el helio son los elementos más abundantes en el cosmos, luego le siguen en abundancia el carbono, oxígeno y nitrógeno. Hay una cierta correlación no estricta en cuanto al número atómico y la abundancia, cuanto más pesados son los elementos más raros tienden a ser, con algunas excepciones como en el caso del litio, boro y berilio que son elementos muy raros en el universo. Los elementos más livianos, el hidrógeno y el litio, tienen un origen cosmológico, o sea que fueron creados inmediatamente después del Big Bang: fueron los elementos primordiales con los que se formaron las primeras estrellas. Luego en el interior de las estrellas se formaron los restantes elementos: carbono, nitrógeno, oxígeno; y en estrellas más viejas se formaron los elementos más pesados.

Conclusión

A partir de un libro de Martin Harwit llamado “Cosmic Discovery”⁴, se pueden ver los descubrimientos más importantes en Astronomía, que dan una idea de cómo ha avanzado nuestro conocimiento del universo a través de la historia (Fig. 3).

Figura 3



1 –Stars	16 –Cold Interstellar Gas	30 –Interstellar magnetic Fields
2 –Planets	17 –Giants/Main Sequence Stars	31 –X-Ray Stars
3 –Novae	18 –Cosmic Rays	32 –X-Ray Background
4 – Comets	19 –Pulsating Variables	33 –Quasars
5 –Moons	20 –White Dwarfs	34 –Microwave Background
6 –Rings	21 –Galaxies	35 –Masers
7 –Galactic Clusters	22 –Cosmic Expansion	36 –Infrared Stars
8 –Clusters of Galaxies	23 –Interstellar Dust	37 –X-Ray Galaxies
9 –Interplanetary Matter	24 –Novae/Supernovae	38 –Pulsars
10 –Asteroids	25 –Galaxies With/Without Gas	39 –Gamma-Ray Background
11 –Multiple Stars	26 –Supernova Remnants	40 –Infrared Galaxies
12 –Variable Stars with Nebulosity	27 –Radio Galaxies	41 –Superluminal Sources
13 –Planetary Nebulae	28 –Magnetic Variables	42 –Gamma-Ray Bursts
14 –Globular Clusters	29 –Flare Stars	43 –Unidentified Radio Sources
15 –Ionized Gas Clouds		

⁴ Harwit, M. (1981). “Cosmic Discovery. The Search, Scope and Heritage of Astronomy”, Harvester Press, Brighton.

Este libro se refiere justamente a como se han ido incorporando nuevos descubrimientos en Astronomía, y en el mismo el autor especula acerca de cuándo terminaremos de conocer todo el universo, un tema en el cual es difícil aventurarse. En la antigüedad se conocían pocos objetos en el cosmos, este conocimiento creció exponencialmente a partir de allí, y en el siglo XX se han agregado objetos a este zoológico cósmico como: las nubes moleculares, las nubes gaseosas que pueblan el medio interestelar, los rayos cósmicos, el polvo interestelar, las galaxias ya mencionadas, otros objetos muy energéticos como los cuasáres, que son galaxias provistas de una actividad inusual, radiogalaxias detectables con las ondas de radio, etc. El siglo XX ha abierto una ventana hacia todo un universo que no conocíamos. En la Tabla 1 se ofrece un cuadro comparativo de los principales paradigmas y técnicas observacionales astronómicas en 1900 y 1999.

23 de setiembre de 1999.

Nota: una referencia útil en relación a esta temática es el libro de Timothy Ferris, “La aventura del universo. De Aristóteles a la teoría de los cuantos”, Grijalbo Mondadori, Barcelona, 1990.