

# EL BIG BANG Y LA FÍSICA DEL COSMOS

DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED





# ESCRITURA EN CIENCIAS

DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED



Instituto Nacional  
de Formación Docente  
**Ministerio de Educación**  
Presidencia de la Nación

**Presidenta de la Nación**  
Cristina Fernández De Kirchner

**Ministro de Educación**  
Alberto Sileoni

**Secretaria de Educación**  
Jaime Perczyk

**Secretario del Consejo Federal de Educación**  
Daniel Belinche

**Secretario de Políticas Universitarias**  
Martín Gil

**Subsecretario de Planeamiento Educativo**  
Marisa del Carmen Díaz

**Subsecretaria de Equidad y Calidad**  
Gabriel Brener

**Instituto Nacional de Formación docente**  
Verónica Piovani

**Dirección Nacional de Formación Docente e Investigación**  
Andrea Molinari

**Coordinadora de Investigación Educativa del INFD**  
Inés Cappellacci

# PRESENTACIÓN

Los libros que se presentan en esta edición son el resultado de la segunda etapa del dispositivo Escritura en Ciencias, desarrollado durante los años 2011-2012 en el Instituto Nacional de Formación Docente y cuyos principales protagonistas fueron profesores de institutos de formación docente de las provincias de Buenos Aires, Catamarca, Chaco, Chubut, Córdoba, Entre Ríos, Formosa, Neuquén, San Luis, Santa Cruz, Santa Fe, Santiago del Estero y Tucumán.

Los libros que se produjeron en esta ocasión, corresponden a los siguientes títulos:

7. Ecosistemas terrestres
8. Ecosistemas acuáticos
9. El big bang y la física del cosmos
10. Cambio Climático
11. Energía: características y contexto
12. Epidemias y Salud Pública

La génesis de este proyecto se inspiró en el programa Docentes Aprendiendo en Red del Sector Educación de la Oficina de UNESCO, Montevideo. Esta experiencia innovadora en nuestro país, reunió a 30 profesores de diferentes provincias que, a través de un trabajo colaborativo, escribieron seis libros sobre contenidos de problemáticas actuales de las ciencias naturales.

Haber escrito los seis primeros libros de la colección<sup>1</sup> durante 2010-2011 supuso para la continuidad algún camino allanado. Este segundo ciclo estuvo marcado por una inusitada resonancia de la edición anterior del proyecto, verificada en encuentros con profesores de diferentes provincias, interesados en conocer los materiales y saber más sobre la propuesta. Por esta razón deseamos compartir algunas reflexiones sobre el desarrollo del proceso.

Un eje central del proyecto se asienta en la escritura y su potencial, no sólo como posibilidad de difusión del saber de los profesores, sino como un medio para hacer de lo vivido en el propio trabajo, un objeto de experiencia. Es decir,

---

1 1. Los plaguicidas, aquí y ahora; 2.H2O en estado vulnerable; 3. Del Gen a la Proteína; 4.La multiplicidad de la vida; 5. Cerebro y Memoria; 6. La evolución biológica, actualidad y debates.

una oportunidad de generar cierta ruptura de lo sabido y conocido respecto a lo que suscitan temas actuales de la agenda de las ciencias naturales y codificarlo en el lenguaje docente. Por eso, los textos comunican el resultado de un ejercicio reflexivo en el que la escritura actúa como un importante mediador.

Los docentes han pasado durante un año con escrituras sometidas a ciertas condiciones para poder funcionar: cumplir plazos, compartir con los pares, discutir los temas, los avances, realizar y recibir devoluciones que impliquen lecturas atentas y cuidadosas de otras producciones y a la vez, ofrecer las propias al juicio de los colegas. Todas estas actividades se inscriben en un dispositivo capaz de darles cabida y que invita a los profesores a constituirse en autores de textos de temáticas muy específicas de las ciencias naturales.

Si bien la invitación se cursa a los profesores, no se trata de una invitación al trabajo individual, sino que se convoca a un trabajo colectivo, con alto grado de colaboración. Este es un aspecto muy difícil de construir y donde creemos que radica buena parte de la adhesión con la que cuenta este proyecto. Dos aspectos se conjugan, a nuestro juicio, en esta dificultad, uno asociado a la misma matriz de la docencia que sugiere un trabajo solitario y alejado de las visiones de los pares. El otro, ligado a reorganizar la representación de que la escritura no es una práctica que pueda resolverse con la sola intención y voluntad de escribir: requiere otras condiciones.

Los textos de Escritura en Ciencias tienen un tiempo de gestación y retrabajo, surgidos de un boceto inicial provisorio, sobre la temática sugerida y donde comienza la transformación de las ideas preliminares que, a medida que transcurre el proceso, ponen más de una vez en el centro la dificultad de hallar el recurso a emplear para expresar y expresarse de la manera más clara y más efectiva sobre temas de actualidad científica, difíciles y complejos de sobrellevar. La tarea se apoya con una plataforma virtual que colabora para que los profesores puedan sortear la distancia y sostener la tarea grupal de escribir.

El avance del boceto, al tiempo que se estudia y se profundiza un tema se convierte en la tarea cotidiana que no es una tarea libre y excesivamente centrada en la subjetividad de cada autor, sino que se somete a la previsión acordada con el grupo y a los tiempos que el coordinador va marcando, a fin de que la tarea pueda concretarse en los tiempos estipulados para el proyecto.

A esta exigencia se suma la actitud con la que se solicita leer los borradores. Para ser consecuentes con el proceso de avance de un texto, la lectura primera que abre el juego a las devoluciones entre pares requiere estar enfocada más que

en la forma “correcta” de cómo lo dice, hacia lo que su autor intenta decir. Lo que interesa es que el pensamiento comience a manifestarse a través de la palabra escrita. Seguramente al inicio las producciones tienen un limitado alcance, pero el ejercicio resulta muy fecundo en cuanto a primera oportunidad para darse a leer y poner oídos a las devoluciones que recibirá. Este primer disparador abre un campo de expectativas de inusitado valor como motor de todo el proceso siguiente.

Los momentos de zozobra, de exposición necesaria, implícitos en el darse a leer, tienen la función de colaborar para que se produzca el desapego hacia el resultado inmediato y exitoso de la empresa de escribir. Quizá es una de las rupturas más importantes a los modos habituales que tenemos de posicionarnos frente a la propia palabra. Ingresar las incertidumbres y angustias propias en la propia escritura, reconocerse como parte de una obra que empieza a tomar forma y que poco a poco, comienza a ser reconocida como común entre los grupos, representa aquello que sostiene frente a la tendencia a huir ante la primera gran dificultad.

La experiencia que transitamos durante este tiempo demuestra que los profesores tienen interés por escribir y mejorar sus escrituras. Y concluyen con la idea de que sus producciones han devenido en textos que otros educadores pueden conocer, estudiar y abonar con ellas su propio trabajo.

Una primera cuestión para destacar, la disposición y el entusiasmo que despierta en cada edición “Escritura en ciencias” se debe quizá al hecho de que los autores de los textos son los mismos profesores: Docentes de los institutos que escriben para sus colegas. Lo inusual de esta iniciativa es ligar la autoría a la docencia, previniendo con esta atribución que este discurso no es una palabra cotidiana, indiferente y que puede consumirse inmediatamente, sino que se trata de una palabra que debe recibirse de cierto modo y recibir, en una cultura dada, un cierto estatuto, como sostiene Foucault.

La segunda cuestión relevante refiere al compromiso de estudiar, profundizar sobre el tema elegido, hacer de ello un objeto de estudio y de problematización. La búsqueda de material bibliográfico, las discusiones e intercambios con los colegas y con investigadores de referencia, el trabajo en talleres presenciales, entre otras, son acciones que imprimen una lógica diferente al trabajo y sirven de indicador de la buena disposición que tienen los docentes para vincularse con el conocimiento.

Recuperar los saberes de los profesores, ponerlos en valor en una publicación significa una buena parte de la atracción que ejerce el proyecto sobre cada uno de los participantes. Quizá porque asumir la posición de autores les asigna una doble

responsabilidad, para sí mismo y para los demás, que hay que tramitar durante el proceso. Dar cuenta de lo que escribe, de cada argumentación que se sostiene, hacer de esta práctica una tarea habitual que se juega en cada encuentro, frente a coordinadores, a otros colegas, sirve de foro de discusión colectiva para mostrar y mostrarse en la vulnerabilidad que todo acto de escribir para otros coloca.

Los seis libros que sumamos a esta colección tienen una estructura experimentada en la edición anterior, cada capítulo de autoría individual, a la que quisimos sumar otra apuesta proponiendo a los profesores un ejercicio ligado a su oficio en clave de propuestas enseñanza de las ciencias. El capítulo de cierre de cada uno de los libros de esta edición tiene autoría compartida, contiene propuestas, reflexiones, ideas para pensar la enseñanza de cada uno de los temas.

Esta nueva presentación abona otra vez el deseo de que la autoría de los docentes se convierta en un componente relevante de la propuesta formativa, y sea bienvenida en este conjunto de producciones que codifican y comunican temas de la actualidad científica en el lenguaje de la docencia. Y en el encuentro que toda escritura persigue con las lecturas de otros (docentes, alumnos) den lugar a otros textos que reorganicen la experiencia de la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia.

Liliana Calderón  
Coordinación Escritura en Ciencias

ESCRITURA EN CIENCIAS

# ***EL BIG BANG Y LA FÍSICA DEL COSMOS***

Autores:

Roberto Carlos Ferrari

Lía Celinda Acosta

Daniel Stigliano

Eugenio Valiero

David Merlo

Orientación y asesoramiento científico: Alejandro Gangui

Coordinación de Escritura: Verónica Bibiana Corbacho

**Autores**

Roberto Carlos Ferrari  
Lía Celinda Acosta  
Daniel Stigliano  
Eugenio Valiero  
David Merlo

**Equipo Escritura en Ciencias del Instituto Nacional de Formación Docente**

Liliana Calderón, Carmen E. Gómez y Antonio Gutiérrez

**Orientación y asesoramiento científico**

Alejandro Gangui

**Coordinación de escritura**

Verónica Bibiana Corbacho

**Diseño editorial**

Renata Kándico, Gastón Genovese [www.estudiolate.org](http://www.estudiolate.org)

Hecho el depósito que establece la ley 11.723

“Los textos de este libro son copyleft. El autor y el editor autorizan la copia, distribución y citado de los mismos en cualquier medio y formato, siempre y cuando sea sin fines de lucro, el autor sea reconocido como tal, se cite la presente edición como fuente original, y se informe al autor. La reproducción de los textos con fines comerciales queda expresamente prohibida sin el permiso expreso del editor. Toda obra o edición que utilice estos textos, con o sin fines de lucro, deberá conceder estos derechos expresamente mediante la inclusión de la presente cláusula copyleft.”

El big bang y la física del cosmos / Roberto Carlos Ferrari ... [et.al.].

- 1a ed. - Buenos Aires :

Ministerio de Educación de la Nación, 2013.

196 p. ; 21x15 cm. - (Escritura en ciencias; 9)

ISBN 978-950-00-0988-1

1. Formación Docente. 2. Enseñanza de las Ciencias. I. Ferrari, Roberto Carlos  
CDD 371.1

Fecha de catalogación: 25/02/2013

# ÍNDICE

Presentación .....	5
Introducción .....	15
<b>Capítulo 1: Cosmologías previas al “Big Bang” .....</b>	<b>19</b>
Roberto Carlos Ferrari y Lía Celinda Acosta	
El cielo antiguo .....	20
Primeras explicaciones teóricas. Fundamentos filosóficos del geocentrismo .....	21
Correcciones necesarias para preservar el modelo aristotélico. Ptolomeo .....	23
El cambio de paradigma. Copérnico y el heliocentrismo .....	26
La teoría heliocéntrica .....	28
Giordano Bruno y el paso decisivo. El universo infinito .....	33
Kepler. La armonía matemática del mundo .....	34
Las tres leyes de Kepler .....	37
Galileo y el telescopio .....	39
Las evidencias observacionales del sistema copernicano .....	41
Llegamos al final de nuestro recorrido histórico .....	42
<b>Capítulo 2: El Universo del “Big Bang” .....</b>	<b>45</b>
Daniel Stigliano	
La Humanidad y la indagación del cosmos .....	45
Las distancias en el Universo .....	47
El Sistema Solar .....	52
La Vía Láctea .....	56
El Grupo Local .....	60
Las estrellas .....	62
El conocimiento del cosmos y el mañana .....	69
<b>Capítulo 3: Fundamentos teóricos y observacionales de una nueva teoría .....</b>	<b>73</b>
Eugenio Valiero	
Grandes avances observacionales durante el siglo XX .....	73
Gravitación y relatividad. Las ecuaciones del universo .....	76
¿De dónde proviene la luz del universo? .....	82
El universo visto “microscópicamente”. Los modelos atómicos y la constitución de la materia .....	86

Partículas atómicas elementales y Mecánica Cuántica.....	92
Efecto Doppler-Fizeau. El universo en expansión .....	97
Friedmann y Lemâitre .....	98
Nucleosíntesis atómica. Materia bariónica y no bariónica .....	100
La radiación cósmica de fondo y la Teoría del Universo Estacionario .....	101
<b>Capítulo 4: La Teoría del “Big Bang” .....</b>	<b>105</b>
<b>David Merlo</b>	
Descripción matemática .....	107
El Modelo Estándar .....	109
La Singularidad Inicial .....	110
Rastreando los orígenes .....	110
¿Coordenadas del “Big Bang”? .....	112
Cronología Universal .....	113
Preliminares .....	113
El Universo Primordial - Era de la Radiación .....	114
El Universo Temprano - Era de la Materia .....	117
El Universo Contemporáneo - Era de la Materia (cont.) .....	117
El Universo Contemporáneo - Era de la energía oscura .....	119
El Futuro Oscuro del Universo .....	120
Los Problemas del Modelo Estándar .....	122
Generalidades .....	122
Los Monopolos Magnéticos .....	122
El Horizonte y la Planitud .....	122
La Inflación .....	123
Las fluctuaciones cuánticas .....	126
La Historia Térmica del Universo .....	127
Generalidades .....	127
El Enfriamiento del Plasma .....	128
¿Universo en Rotación? .....	128
Consideraciones finales .....	129
<b>Capítulo 5: Límites y desafíos de la Teoría del “Big Bang” .....</b>	<b>135</b>
<b>Lía Celinda Acosta</b>	
Modelos del Big Bang más reciente .....	137
Modelo $\Lambda$ CDM con lambda atractiva .....	138

Modelo $\Lambda$ CDM con lambda repulsiva .....	139
El modelo $\Lambda$ CDM con $\Lambda$ repulsiva como un Modelo de Concordancia .....	140
Modelo "Modified Newtonian Dynamics" (MOND) .....	141
Modelos de defectos topológicos cósmicos: cuerdas cósmicas.....	142
Propuestas alternativas para explicar la base observacional de los modelos del Big Bang .....	145
Cuando se deja de lado la hipótesis de homogeneidad .....	145
Metagalaxia primordial. Materia y antimateria .....	147
Otras interpretaciones del corrimiento al rojo .....	148
Modelos de la luz cansada .....	150
Modelo del estado estacionario .....	151
El modelo cuasi-estacionario .....	153
A modo de resumen .....	154
Cosmología Cuántica de Bucles .....	155
La singularidad. Necesidad de una nueva teoría .....	155
Gravitación cuántica de bucles .....	157
Fundamentos teóricos de la cosmología cuántica de bucles .....	158
Para concluir .....	160
<b>Capítulo 6: La enseñanza y el aprendizaje. Algunos tópicos pertinentes</b> .....	<b>163</b>
<i>Lía Celinda Acosta, Daniel Stigliano, Eugenio Valiero y David Merlo y Roberto Ferrari.</i>	
La realidad modelizada .....	165
De las teorías ingenuas al conflicto cognitivo .....	170
Visiones cosmológicas en el tiempo .....	173
Primeras concepciones .....	173
Primeros registros .....	173
Construcción y materialización de concepto .....	173
Geocentrismo .....	174
Heliocentrismo .....	175
Profundizando la observación del cosmos .....	176
La expansión del universo .....	177
Reflexión final .....	179
La Arqueoastronomía como recurso para la enseñanza de la Astronomía... ..	181
Justificación de la propuesta didáctica .....	182
Introducción .....	182

Objetivos de la propuesta didáctica .....	184
Actividades .....	184
Desarrollo del referente teórico y la metodología .....	184
Para concluir .....	185
 Bibliografía .....	 190

# INTRODUCCIÓN

Escribir un libro es una tarea compleja. Cuando con gran expectativa nos enfrentamos a ella lo hicimos convencidos de iniciar un camino en el cual se presentarían dificultades de diversa índole. En un principio debimos apropiarnos de las herramientas de la comunicación científico-académica. Luego debimos concebir un esquema que sintetizara los contenidos que deseábamos transmitir, analizar la posibilidad de discurrir acerca de ellos y disponer de un diseño coordinado para la participación de cada uno de los cinco autores en la producción del texto. La comunicación e intercambio fue esencialmente virtual puesto que somos educadores de distintas provincias.

Llevar a cabo la tarea de escribir acerca del universo también significó idealizarnos como escritores, e idealizarlos a ustedes, como lectores. Los hemos imaginado de diferentes maneras pero en términos generales esta obra estará dirigida a docentes y estudiantes de profesorado, no necesariamente de Física. Es factible, por ejemplo, que un docente de Biología o de otros espacios curriculares pueda incluir entre la bibliografía recomendada un capítulo o parte de este libro para iniciar un tema mediante la discusión de los conceptos que aquí se presentan. Hemos considerado importante construir un texto con un enfoque global unificado, pero que a la vez incluyera las miradas particulares de cada uno de los escritores.

Si bien cada capítulo forma parte de un entramado que en conjunto es único, puede leerse por separado, en el orden que el interés o la necesidad del lector disponga.

Atendiendo a la concepción actual sobre la enseñanza de las ciencias, pensamos que era preciso abordar el contenido de este texto de modo que incluyese las dimensiones histórico-culturales, disciplinar, metodológica y epistemológica para propiciar la reflexión y la comprensión del modo en que el científico construye el conocimiento científico. Los procesos dinámicos que ocurren en el Universo, su transformación a lo largo del tiempo y el interés que despierta en el ser humano en todas las culturas y civilizaciones a lo largo de la historia, constituye en sí mismo una metáfora pedagógica desde donde es posible enfocar el aprendizaje como un proceso en permanente evolución.

A lo largo de toda la obra los lectores se encontrarán con un hilo histórico en el que se entrelazan algunas anécdotas, analogías, datos, comparaciones y explicaciones en seis capítulos. Nos proponemos entregarles un libro que hable, entre otros tópicos, acerca de qué es y qué no es el "Big Bang", qué postula el principio

cosmológico, cuáles son las hipótesis básicas, las ecuaciones de Einstein; cómo el alejamiento de las galaxias observado por Hubble, la generación de elementos livianos y la radiación cósmica de fondo se constituyen en los pilares de la cosmología moderna; cómo se forman las estructuras cósmicas, qué predice la teoría sobre la evolución futura del Universo, cómo los diferentes componentes de materia/energía afectan la evolución, cuáles son las observaciones más recientes.

Iniciamos el texto con un recorrido por las especulaciones cosmológicas más antiguas hasta la época de Galileo que contempla el despertar del pensamiento cosmológico científico en la humanidad y mostramos el deseo permanente por explicar el cielo y sus movimientos, planteando modelos y razonamientos antagónicos, defendidos a veces con vehemencia por sus protagonistas, en donde el contexto histórico, social y político condicionan tanto la producción del conocimiento como su aceptación. En el segundo capítulo hacemos referencia a las distintas estructuras que forman el Universo e incluimos algunos datos comparados respecto de distancias astronómicas, entre otros aspectos. En el capítulo tercero exponemos algunos de los aspectos físicos, teóricos y observacionales que dan origen a los modelos del “Big Bang”; los mismos son necesarios para complementar el capítulo cuarto, en el que se desarrollan y analizan dichos modelos. Luego, en el capítulo quinto consideramos algunas limitaciones que ha tenido que sortear la Teoría del “Big Bang”, los modelos alternativos y las propuestas actuales de la comunidad científica. Finalmente proponemos un capítulo que integra aspectos pedagógicos y epistemológicos vinculados a la enseñanza de las ciencias y, especialmente, en lo que atañe a la cosmología y a la astronomía.

Esperamos que esta obra sea útil y cubra alguna necesidad en el trayecto formativo de colegas y alumnos de nuestros institutos de profesorado. Te invitamos a encontrarnos en el texto y que el mismo genere un espacio de diálogo entre autores y lectores.





# CAPÍTULO I

## *Cosmologías previas al Big Bang*

Roberto Carlos Ferrari y Lía Celinda Acosta

Nuestro universo no siempre fue conceptualizado del mismo modo y a lo largo de su historia el ser humano ha elaborado diferentes concepciones. Además, desde las observaciones más simples desprovistas de instrumentos hasta las evidencias alcanzadas por los últimos desarrollos teóricos y tecnológicos, el objetivo al interpretar y explicar el Universo no ha sido siempre el mismo. A las civilizaciones antiguas tales como las de Babilonia y Egipto les permitió predecir la mejor época del año para realizar la explotación agrícola; a los filósofos griegos les facilitó el marco para desarrollar las bases epistemológicas que perdurarían por más de 2000 años y a los astrofísicos modernos aventurar diseños cosmológicos difíciles de recrear en nuestra imaginación. La necesidad de construir las primeras teorías astronómicas para explicar observaciones cada vez más precisas; la exigencia de predecir con exactitud acontecimientos o fenómenos celestes, y la inquietud por descifrar el origen y evolución del Universo constituyen algunas de las motivaciones que impulsaron a estudiarlo.

En la tarea de abordar el desarrollo de las diferentes cosmologías y de comprender a qué inquietudes respondieron, transitaremos por los momentos cruciales de esta historia. En este recorrido nos centraremos en los aspectos que nos permiten comprender cómo se llega a construir la teoría del Big Bang. Debemos recorrer un largo camino para llegar a nuestro objetivo, prácticamente miles de años han transcurrido para que la humanidad arribara a la concepción actual del universo. Esperamos que la descripción y la explicación de lo acontecido estimulen la reflexión y, al mismo tiempo, se conviertan en el disparador de preguntas para las que aún no tenemos respuestas.

## El cielo antiguo

El ser humano siempre necesitó conocer el ambiente que habita, desde los espacios contingentes hasta los lugares más recónditos. En la búsqueda de este conocimiento, y en el intento por responder a sus necesidades tanto materiales como racionales, construyó a lo largo de la historia las explicaciones que le permitieron sentirse habitante de un mundo conocido. La prolongación de este ambiente hacia los confines más lejanos constituye la idea del universo que nos rodea y descifrarlo da vida a la ciencia llamada Cosmología.

Al recabar información sobre los primeros pasos dados por la humanidad en esta construcción de conocimientos, nos remontamos al paleolítico superior (35.000-10.000 a. C.) en el que el tallado de huesos fue de utilidad para expresar el reconocimiento de regularidades tales como las fases lunares. Estamos hablando de restos fósiles de 30.000 años de antigüedad en los que se encuentran secuencias de 28 o 29 puntos que describen las lunaciones. También se han encontrado imágenes talladas en piedra que se cree hacen referencia al Sol, a la Luna y a las estrellas.

El ser humano comenzó reconociendo los objetos celestes de mayor dimensión visual, en los que la manifestación del movimiento fue más notable, como el caso del Sol y de la Luna. Pero, con el advenimiento de la agricultura y la necesidad de precisar los mejores momentos para realizarla, la raza humana tuvo que vincular los cambios climáticos con las posiciones del Sol en el cielo. Al repetirse las temporadas de frío o de calor, de lluvias o de sequía, debió preocuparse por poder predecir sus instantes de ocurrencia. Había nacido la Astronomía de posición, que consiste en determinar la posición y el movimiento propio de los astros.

Como ejemplos de esta etapa encontramos las alineaciones de Carnac y Le Menec en Francia, construidas con 4.000 menhires que señalan la salida del Sol, el día en que debe comenzar la siembra, y que datan del 6.700 a. C. En Gran Bretaña, del 3.700 al 2.100 a. C. se erigieron los círculos de Stonehenge con el objeto de determinar las salidas y puestas del Sol y la Luna a lo largo del año. En tanto, en Egipto habían registrado que las estrellas realizan un giro completo en poco más de 365 días y antes del 2500 a. C. usaban un calendario basado en ese ciclo.

Aproximándonos a la primera mitad del milenio previo a nuestra era encontramos el legado de los babilonios quienes sin duda fueron los que llegaron más lejos en la sistematicidad de las observaciones, lo que le permitió predecir regularidades. Esta civilización desarrolló un calendario basado en el movimiento del Sol y las fases de la Luna que tendría vigencia hasta 500 a. de C. Se puede

inferir que en 763 a. de C. conocían la periodicidad de los eclipses de Sol, dejando evidencias de la observación del eclipse solar del 15 de junio de aquel año. Es precisamente Babilonia el paso previo a la etapa de las respuestas racionales. La necesidad de diseñar modelos y formular hipótesis teóricas se manifiesta en una cultura posterior, la Grecia de fines del milenio previo a Cristo.

## Primeras explicaciones teóricas. Fundamentos filosóficos del geocentrismo

La rica recopilación de observaciones y el extenso registro de regularidades logrados por la astronomía babilónica resultaron ser el paso previo al desarrollo logrado por el pensamiento griego, que acepta el desafío de construir teorías explicativas sustentadas en estas regularidades. Esto marcaría indefectiblemente el desarrollo cultural de Occidente. Llegan hasta nuestros días los trabajos de Tales de Mileto (630 -545 a. C.), quien predijo el eclipse de Sol del 28 de mayo del 585 a. C.; de Anaximandro (610 - 545 a. C.), que en el mismo tiempo propone un universo infinito y realiza un modelo del sistema Tierra, Sol, Luna, deja de lado las fundamentaciones mitológicas e inicia el camino de las justificaciones científicas. Otros nombres enriquecen esta lista, como Filolao (siglo V a. C.), que supuso un fuego central alrededor del cual giran los cuerpos celestes; Heráclides (siglo IV a. C.), quien explica la sucesión de los días y las noches como resultado de la rotación diaria de la Tierra; y un siglo más tarde el arriesgado Aristarco de Samos que supone la traslación de la Tierra alrededor del Sol, pero sus contemporáneos no aceptaron esta teoría ya que prevalecía la representación de una Tierra inmóvil en el centro del universo.

La concepción geocéntrica del universo nutre a la historia de la cosmología de la producción de Aristóteles de Estagira (384 a. C. - 322 a. C.). Este discípulo de Platón sostiene que los únicos movimientos permisibles eran circulares y uniformes dado que éstos responden a exigencias estéticas cuyo fundamento es la convicción de que el círculo es la figura de mayor perfección y el movimiento uniforme el de mayor simpleza. La influencia de esta concepción se mantendrá hasta el siglo XVII de nuestra era. La herencia de Aristóteles aún hoy perdura en las posturas que se fundamentan en lo intuitivo y puramente sensorial. Su teoría está basada en respuestas desde el sentido común a la experiencia de la observación cotidiana del mundo que lo rodea. La descripción del *kosmos* aristotélico constituye el primer modelo teórico que “signó de modo irreversible el desarrollo

cultural de Occidente. De allí en más, una cosmología aceptable no habría de ser una mera constelación de creencias que nos brinde, con el auxilio de los dioses, la calidez de un hogar” (Boido, 1998:23).

La cosmología aristotélica concibe a la Tierra esférica, inmóvil y ubicada en el centro del Universo. Nuestro planeta, desde un privilegiado lugar, es “testigo” de este universo compacto, con estructura de capas de cebolla en movimiento correspondientes a cada planeta de los cinco conocidos en la época (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno) y que incluye también a la Luna y al Sol, como se muestra en la figura 1.1. Otra característica es la finitud del universo, que está limitado por las estrellas fijas y en él no existe el vacío. Tales cuestiones ponen de manifiesto que Aristóteles adoptó ideas astronómicas de filósofos anteriores a las que integró en un completo programa de carácter teórico, constituyéndose para muchos epistemólogos en la primera elaboración de carácter científico de la historia.



Figura 1.1

El Universo aristotélico según Petrus Apianus (1524).

Recuperado el 15/06/2012 de: <http://pseudópodo.wordpress.com/el-lugar-de-Dios>

La claridad con la que Aristóteles desarrolló su teoría le aseguró la perdurabilidad por tanto tiempo. En el fondo de las estrellas fijas, que a lo largo de un año nos muestra el transitar de las constelaciones, aparecen los planetas, “errantes” para los griegos, quienes calificaron de esta manera a Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. En su camino estelar a lo largo del año y mostrando diferentes declinaciones, junto al Sol y a la Luna, dan este aspectos de vagabundos frente

al orden que respetan las estrellas dentro de cada constelación. Así nace la idea de Zodíaco, en referencia a las doce constelaciones “visitadas” por el Sol en su “camino anual por el cielo” o eclíptica de acuerdo con los cosmólogos griegos.

Descifrar el universo observado por entonces se constituyó en el principal desafío de la teoría aristotélica. Éste parecía estar superado hasta que ciertas manifestaciones “extrañas” en el movimiento planetario motivaron la intervención de otros recursos y la aparición de quienes aceptaron el reto de intentar resolverlas.

## Correcciones necesarias para preservar el modelo aristotélico. Ptolomeo

¿Cuáles serían las condiciones necesarias para que el conocimiento sobre el universo diera otro paso importante? ¿Cuál sería el lugar indicado para que aquellos que tuvieran una inspiración reveladora pudieran aplicar los recursos disponibles para avanzar y resolver los problemas surgidos en la teoría aristotélica? Estas y otras preguntas podrían guiarnos en la comprensión del siguiente paso, una instancia crucial que dejaría un legado que se prolongará por 1.500 años.

Los estudios sobre historia de la ciencia nos dicen que fue en Alejandría, durante los seiscientos años posteriores al 300 a. C., donde los seres humanos emprendieron, en un sentido básico, la aventura intelectual que nos ha llevado a las orillas del espacio. Luego de las grandes conquistas realizadas por Alejandro Magno (356 - 323 a. C.), la cultura del Mediterráneo, que había florecido en la antigua Grecia, se trasladó a la ciudad de Alejandría, en el primitivo mapa de Egipto, convirtiéndola en el centro del conocimiento de la época. El triste final de su legendaria biblioteca, que fuera incendiada en los inicios de nuestra era, llega hasta nuestros días como ejemplo de uno de los hechos más hostiles contra el conocimiento científico de una época. Aunque no se conoce el número con exactitud, se cree que en su apogeo tuvo unos 700.000 manuscritos, los cuales equivalen aproximadamente a unos 100.000 libros impresos de hoy.

En los registros de algunos historiadores, figura que cuando Atenas prestó los textos de Eurípides, Esquilo y Sófocles, en Alejandría se guardaron los originales y devolvieron las copias. En la biblioteca se hicieron los primeros trabajos sistemáticos de copiado, enmienda y comparación de textos clásicos sin los cuales ninguno de los autores de entonces que hoy en día continuamos disfrutando hubiera sobrevivido.

Alejandría fue una ciudad esplendorosa en lo cultural, en la que habitaban los sabios y pensadores de la época y en la que surge la figura de Claudio Ptolomeo (siglo II d. C.), de él se tienen pocos datos biográficos pero a él se debe que la cosmología aristotélica haya afrontado los primeros conflictos observacionales y perdurado por tantos siglos. Ptolomeo recurrió a las observaciones de Hiparco de Nicea (siglo II a. C.) que había catalogado más de 1000 estrellas y a quien también se le adjudica la invención del astrolabio, instrumento que permite determinar la ubicación de las estrellas en la bóveda celeste, y observaciones propias realizadas desde Alejandría entre 127 y 141 d. C. La obra más importante de Ptolomeo es el *Almagesto*, un tratado que comprende trece libros. El nombre griego original se traduce como “La recopilación matemática” pero este título fue reemplazado pronto por otro título griego que significa “La más grande recopilación”. Éste se tradujo al árabe como *al-majisti* (el más grande) y de aquí se tradujo al latín como *Almagesto*.

En palabras del profesor de historia y filosofía de la ciencia Gerd Grasshoff (1990:1), “el *Almagesto* de Ptolomeo comparte con los *Elementos* de Euclides, la gloria de ser uno de los textos científicos usados durante más tiempo. Desde su concepción en el siglo II hasta finales del Renacimiento, determinó la astronomía como ciencia. Durante este tiempo, el *Almagesto* no fue sólo un trabajo sobre astronomía; la materia fue definida conforme lo que se describe en el *Almagesto*”. De los trece libros mencionados, los últimos cinco representan la obra maestra de Ptolomeo, son los que discuten la teoría sobre los planetas. Este debe ser su logro más importante en términos de una contribución original, ya que al parecer no había ningún modelo teórico satisfactorio que explicara los muy complicados movimientos de los cinco planetas antes del *Almagesto*.

Por esa época ya se habían detectado ciertas “irregularidades” en el tránsito de estos astros vagabundos sobre el fondo de las estrellas fijas. En determinadas épocas del año, los planetas parecen desacelerar su marcha, hasta desplazarse en sentido contrario, aumentar su brillo y luego retomar el curso original de su movimiento. Este fenómeno denominado retrogradación acontece más de una vez a medida que el astro viaja a través del Zodíaco. La observación del movimiento retrógrado de los planetas, especialmente de Marte, ya había sido registrada con siglos de anterioridad, pero, en el marco de la filosofía platónica, que trataba de la totalidad ordenada y armoniosa de los objetos celestes y del movimiento circular como único permitido, tales irregularidades eran consecuencia de la ilusión de los sentidos. De esta manera, la pretensión filosófica inicial fue la de no atender a las mismas y asumirlas como subjetividades que hacen antiestético y desordenado

al firmamento que observamos; sin embargo, las exigencias estéticas de la filosofía no evitarían que los astrónomos posteriores abordaran el tema e intentaran dar una respuesta.

Ptolomeo heredó un recurso que los astrónomos de la antigüedad habían introducido para explicar el movimiento de los "astros errantes". El mismo consistía en una construcción geométrica-cinemática en la cual a cada planeta le corresponde como trayectoria una circunferencia centrada en la Tierra; a su vez, el astro gira alrededor de un punto de la circunferencia anteriormente descrita. La primera fue llamada deferente y la segunda epiciclo. La composición de ambas trayectorias da como resultado una suerte de camino en espiral, epicicloide, como se observa en la figura 1.2.

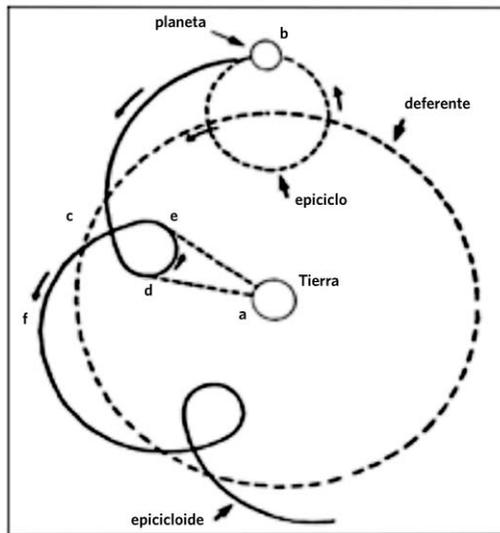


Figura 1.2

Representación del movimiento planetario de acuerdo a la teoría de deferentes y de los epiciclos. Recuperado el 15/06/2012 de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>

La composición de estos movimientos explicaba el aparente cambio de sentido en el movimiento del planeta. Ambos movimientos son uniformes con respecto al centro de rotación. Entre los puntos b y c de la figura, el curso del planeta es directo hacia el este, pero luego entre d y e, el sentido se invierte, además de acercarse hacia la Tierra, observándose la retrogradación. Finalmente retoma el curso "normal", en sentido hacia el este. La idea del epiciclo es la de explicar la re-

trogradación y el aumento de brillo y tamaño del planeta que se observa repetidas veces en transcurso del movimiento orbital del planeta.

Este recurso *ad hoc* incluido por Ptolomeo en el intento de “salvar” al geocentrismo aristotélico de las irregularidades observadas en los planetas no fue suficiente. Acaso el Sol, ¿también retrograda?, o ¿son coincidentes los puntos en los que se completa un epicicloide con la órbita anual del planeta? Observemos como ejemplo a Mercurio. Este planeta retrograda una vez cada 116 días, pero vuelve a ocupar su posición original con respecto a las estrellas fijas, luego de 365 días, en lo que sería el “año” de Mercurio. Como 365 no es múltiplo de 116, la curva que se obtiene al componer los dos movimientos, deferente y epiciclo, no es cerrada y los lazos se van desplazando hacia el oeste con cada órbita completa. Estas y otras diferencias entre lo observado y las predicciones de la teoría obligaron a los astrónomos a introducir recursos geométricos adicionales. El “ecuante”, un modelo sencillo para el Sol, consistente en un movimiento circular con velocidad angular uniforme en el que la Tierra no estaba en el centro del círculo sino a una distancia respecto a dicho centro (tema del Libro 3 del *Almagesto*), “epiciclos menores” y “circunferencias excéntricas” completan los recursos destinados a encajar a la fuerza con las observaciones.

El resultado de los esfuerzos de Ptolomeo no fue satisfactorio a la hora de explicar el movimiento real de los astros, pero constituyó el inicio del carácter instrumental de la Astronomía. La construcción de excesiva cantidad de figuras y el desarrollo de largos y difíciles cálculos atentaban contra la imagen filosófica de sencillez y belleza elegida para el universo desde la época de Platón. Sin embargo, pasarían muchos siglos de “oscurantismo astronómico” en la civilización europea para que se produjera un cambio en su concepción.

## El cambio de paradigma. Copérnico y el heliocentrismo

Transcurrieron más de 10 siglos desde los escritos de Ptolomeo y el esplendor de Alejandría. En Europa, luego de la caída del Imperio Romano, en 1453, ya no se atendía al pensamiento científico y se estimulaba más el saber con aplicaciones prácticas; los estados feudales que se erigieron sobre sus ruinas no eran un suelo fértil para el crecimiento de las producciones científicas. La única institución que se mantuvo unificada y perdurable fue la Iglesia Católica, las abadías y monasterios fueron los centros que preservaron en sus magníficas bibliotecas los textos antiguos que habían sobrevivido al ocaso del continente, al cuidado de los

monjes copistas. En consecuencia, el principal interés se concentró en los problemas de discusión teológica, adoptando el sistema ptolemaico del mundo, con la Tierra en el centro y el Sol, los planetas y las estrellas fijas girando a su alrededor como dogma.

La ocupación parcial de Europa por los árabes permitió que se recuperara parte del legado del saber científico antiguo. Mahoma, a la par de predicar una guerra santa y de adoctrinamiento religioso, también ordenaba enseñar ciencia y filosofía; del Corán puede extraerse: “la tinta del sabio es tan preciosa como la sangre del mártir”. Los manuscritos antiguos que habían emigrado hacia oriente con los estudiosos que abandonaron Alejandría fueron traducidos por los árabes evitando la pérdida definitiva del saber griego y alejandrino. Durante los siglos X a XV los árabes continuaron las investigaciones en astronomía dejando un importante legado, tradujeron el Almagesto y catalogaron muchas estrellas con los nombres que se utilizan aun en la actualidad, como Aldebarán ( $\alpha$  de Tauro), Rigel ( $\beta$  de Orión), Deneb ( $\alpha$  del Cisne) y las “Tres Marías” Alnilam, Alnitak y Mintaka.

La incursión del imperio árabe en Europa se concretó principalmente en la península ibérica y la ciudad de Córdoba fue la cabeza del Imperio Árabe en suelo europeo. La ocupación que perduró por ocho siglos dejó profundas huellas en la cultura ibérica, y llegó a su fin en 1492 con la reconquista de Granada por parte de los reyes católicos. Al desarrollo del conocimiento, impulsado principalmente por el estudio en las universidades, lo acompañó un aporte de carácter instrumental significativamente importante, la imprenta.

Luego de la contextualización de la época en la que se producen los cambios podemos focalizarnos en los datos biográficos y estudios de Nicolás Copérnico. Nació en Torun, pequeña ciudad de la Polonia prusiana a orillas del río Vístula, en el año 1473. Huérfano desde muy pequeño junto a su hermano mayor Andreas, fue criado por su tío, obispo católico y personaje influyente de la época. Estudió matemática, astronomía, medicina y hasta leyes en distintas universidades de Cracovia en Polonia y de Bolonia, Padua y Ferrara en Italia. Es en el período de Cracovia en el que perfecciona sus conocimientos de matemática a partir de la lectura de una traducción latina del *Elementos* de Euclides, y en astronomía luego de acceder a escritos sobre teoría planetaria, eclipses, y sobre astronomía esférica (estudio y descripción de las posiciones de los objetos astronómicos distribuidos sobre la “esfera celeste”). Las copias que realizó Copérnico de estos materiales de estudio aún se conservan firmados por él. Su tío quiso para el joven Nicolás un futuro eclesiástico, con este fin lo envió a la escuela de la catedral de Wloclawek, dónde comenzó con la formación humanística, luego a la Universidad de Bolo-

nia para conseguir un título en legislación canónica, y finalmente proponiéndolo como canónigo en la catedral de Frauenburg. Este sitio se convertiría en el lugar de reposo y tranquilidad para Copérnico, donde podría observar el cielo y elaborar la revolucionaria teoría heliocéntrica.

## La teoría heliocéntrica

Los problemas observacionales del cielo se manifestaban repetidamente y el modelo ptolemaico no lograba solucionarlos. “Los astrónomos árabes y sus herederos europeos, en base al Almagesto, habían luchado con deferentes, epiciclos y demás artificios matemáticos para calcular y predecir, con poco éxito, las posiciones planetarias”. (Boido, 1998:65)

Antes de su gran obra, Copérnico publicó diversos escritos. En 1514, entre sus amigos más cercanos compartió un pequeño libro manuscrito en el que no se mencionaba autor en la portada, llamado “El pequeño comentario”. En él expone sus opiniones acerca del sistema heliocéntrico del universo y pone de relieve que todos los movimientos de los cuerpos celestes pueden explicarse admitiendo que el Sol es el astro que permanece inmóvil en el centro del universo, y que la Tierra, los demás astros del sistema solar y las estrellas son los que se mueven a su alrededor, describiendo órbitas circulares; afirmaciones que Copérnico expresa en forma de axiomas sobre los que basará su gran obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium Libri VI*.

El gran libro de Copérnico contiene 138 capítulos que completan seis libros en los que se desarrolla la teoría heliocéntrica. La forma esférica de la Tierra y del universo, la magnitud de la Tierra en la inmensidad del universo, los sistemas de coordenadas astronómicas, un catálogo de estrellas con las correcciones correspondientes a los catálogos de Ptolomeo y el estudio completo de los planetas, el Sol (quieto en el centro del sistema) y la Luna, de sus posiciones y sus movimientos, son los temas tratados por el astrónomo. Salió a la luz en marzo de 1543, cuando su autor yacía en cama ya muy enfermo. La teoría heliocéntrica de Copérnico cobraba vida mientras esperaba la etapa de comprobación observacional, que llegaría en el siglo siguiente con la intervención del astrónomo italiano Galileo Galilei. No encontró aceptación general en su época, para ello era necesaria una física no aristotélica; pero sin duda fue la simiente de una revolución científica que culminó con Isaac Newton en una nueva física.

Copérnico fue más un conservador que un revolucionario. Muchas de las ideas que plasmó en sus obras habían sido ya planteadas, lo cual él mismo expli-

citaba. Además, fue en gran medida aristotélico; su trabajo principal, “Seis libros referentes a las revoluciones de las esferas celestes”, menciona en el mismo título la idea aristotélica de las esferas concéntricas. Se abocó a resolver el viejo problema de Platón: la construcción de un sistema planetario por combinación del menor número posible de movimientos circulares uniformes; en particular se oponía al sistema de ecuante introducido por Ptolomeo. Para Copérnico cualquier tipo de movimiento celeste distinto del circular uniforme era imposible: “la inteligencia retrocede con horror” ante cualquier otra hipótesis; “sería inconcebible suponer una cosa tal en una creación constituida del mejor modo posible”. Estos argumentos eran del mismo tipo que los aportados por sus antagonistas escolásticos, excepto que, para estos la inmovilidad de la Tierra era igualmente “obvia”.

Para que las órbitas planetarias concordaran con las observaciones reales, Copérnico introdujo circunferencias que se movían sobre otras circunferencias (deferente y epiciclos), en forma parecida a como lo hiciera Ptolomeo, pero podía considerarse el mismo sentido de movimiento para casi todos los círculos, lo que no ocurría en el modelo geocéntrico. La diferencia principal consiste en que éste había introducido esas combinaciones de circunferencias para explicar el movimiento retrógrado mientras que Copérnico explicó ese movimiento como debido a que los planetas se desplazan en sus órbitas con distintas velocidades, tanto menor cuanto más alejados del Sol se encuentran. Si se compara ambos sistemas, el de Copérnico no es más sencillo que el de Ptolomeo; su simplificación principal consiste en que las circunferencias necesarias en el sistema tolemaico para las rotaciones diarias aparentes de los astros pueden eliminarse al aceptar que la Tierra gira alrededor de su propio eje; casi todas las demás circunferencias subsisten.

Era evidente para Copérnico que la Tierra no puede moverse de manera uniforme, tal como la inversa había sido evidente para Hiparco, siguiendo una circunferencia con centro en el Sol. En consecuencia, desplazó al Sol del centro de la órbita terrestre. En su sistema, el centro del sistema solar y del universo no era el Sol verdadero sino un “sol medio” o el centro de la órbita terrestre. Por ello es preferible calificar el sistema copernicano de heliostático y no de heliocéntrico. El paso de un sistema geoestático a uno helioestático implicó nuevas explicaciones. También pudo determinar la escala del sistema solar a partir de observaciones; en el sistema ptolemaico las distancias no podían determinarse de este modo y no desempeñaban ningún papel, se basaba principalmente en ángulos. Si bien no pudo calcular las distancias absolutas, por primera vez se tenía una idea de las distancias relativas.

Para tener una idea más clara del modelo, consideremos un sistema copernicano simplificado, solamente con circunferencias orbitales. El Sol se halla en el centro, fijo e inmóvil; a su alrededor se mueven los planetas describiendo circunferencias en el siguiente orden: Mercurio, Venus, la Tierra con su Luna, Marte, Júpiter, Saturno. Copérnico explica los movimientos aparentes del Sol, la Luna, las estrellas y los planetas en base al movimiento de rotación diaria de la Tierra; los otros movimientos aparentes se deben al movimiento de traslación orbital de la Tierra alrededor del Sol.

¿Con qué argumentos se rechazaba el sistema copernicano? El primero de ellos fue la falta de observación de la paralaje anual de las estrellas fijas. El fenómeno de paralaje se refiere al desplazamiento de la visual, respecto de un fondo fijo, cuando se observa un objeto desde dos posiciones distintas. En efecto, consideremos el movimiento de la Tierra en el sistema copernicano: si se observan las posiciones de una estrella mediando un intervalos de seis meses, lo que equivale a hacer las observaciones desde los extremos de una línea cuya longitud aproximada es de 320 millones de kilómetros (el doble del radio de la órbita terrestre), debería determinarse la variación de posición de la estrella respecto del fondo de estrellas más lejanas y por ello fijas.

Copérnico y los astrónomos de su época no podían observar este fenómeno debido a la falta de tecnología apropiada (no se había inventado el telescopio aún), debían suponer que las estrellas estaban enormemente lejos, lo que significaba que la esfera celeste se extendía hasta una distancia prácticamente infinita de la Tierra, si en verdad la Tierra se movía alrededor del Sol. La falta de observación de la paralaje anual de las estrellas fijas tendía a negar toda la base del sistema copernicano, hoy diríamos que las predicciones del modelo no eran corroboradas por la observación.

Otro argumento, de mucho peso y antigua data, pues había sido planteado ya en la época de Aristóteles, se refería a cómo explicaba Copérnico el movimiento de los cuerpos sobre una Tierra que se mueve. Suponía que, de alguna manera, el aire se mueve con la Tierra y está unido a ella, de modo que la Tierra arrastra en su movimiento a los objetos que se hallan en el aire; esta suposición se asemeja a una rudimentaria teoría de la gravitación. No se había desarrollado aún la nueva física que diera respuesta a este viejo dilema. Por otra parte, si hoy leyéramos a Copérnico, nos desconcertaría su afirmación de que la Tierra debe tener un movimiento de rotación alrededor de su eje y describir una circunferencia alrededor del Sol debido a que la Tierra tiene forma esférica. ¿Cómo podía entonces afirmar, al mismo tiempo, que el Sol, con su forma también esférica, se hallaba inmóvil?

Otro problema de índole mecánica que Copérnico no pudo resolver se refiere a la Luna. Si la Tierra se mueve alrededor del Sol como los planetas, e incluso si los pájaros cuando se desprenden de las ramas de los árboles no quedan atrás porque el aire está en alguna forma unido a la Tierra ¿cómo es posible que la Luna continúe moviéndose alrededor de la Tierra mientras ésta se desplaza con tanta rapidez en el espacio? Hoy sabemos que la rapidez con que la Tierra rota sobre su eje es aproximadamente de 1600 km/h o 450 m/s y que la rapidez aproximada con que se desplaza en su órbita es de 30 km/s. Aquí se trata no sólo de la adherencia del aire a la Tierra sino de algún tipo de hilo invisible que impide a la Luna perderse en el espacio sideral.

En síntesis, el sistema copernicano era tan complejo como el ptolemaico; y, si se lo aceptaba, surgían problemas físicos (mecánicos) insolubles; todo esto nos permite comprender por qué la publicación de su obra en 1543 no ocasionó, por sí sola, una revolución en el pensamiento físico o astronómico de la época. El historiador Herbert Butterfield (citado en Holton y Brush, 1993) expresó que si se concede a Copérnico una cierta ventaja en el aspecto de la simplicidad geométrica, el sacrificio que habría que hacer sería enorme; se perdería toda la cosmología aristotélica, todo el sistema intrincadamente ensamblado en el que se había establecido tan bellamente la nobleza de los distintos elementos y su disposición jerárquica; habría que dejar de lado todo el armazón de la ciencia existente; y fue allí donde Copérnico falló al no descubrir una alternativa satisfactoria, había conseguido una geometría más bella de los cielos pero en ella no se atendía a las razones y explicaciones que se habían dado antes para explicar los movimientos en el cielo.

Todo los argumentos que hemos expuesto son de índole científica, pero aún nos queda mencionar los problemas que una Tierra en movimiento generaba en el pensamiento de la época, en las ideas del ser humano sobre sí mismo. La singularidad aristotélica de la Tierra, basada en su supuesta posición fija, le confería un sentimiento de orgullo difícil de sostener si pensaba que su residencia era un planeta relativamente insignificante, cuya órbita era la tercera en la serie de siete órbitas planetarias sucesivas. Por otra parte, en las Sagradas Escrituras se menciona repetidamente un Sol en movimiento y una Tierra fija. Martín Lutero condenó las ideas de Copérnico por contradecir la Biblia. Todos conocemos que la defensa del nuevo sistema significó para Galileo un conflicto con la inquisición romana.

¿Cómo llegó Copérnico a su concepción? Quiero compartir con el lector este interrogante que no surgió de mí (que tal vez ya tengo encorsetada la imaginación) sino de una docente que me contaba que quería saberlo para cuando sus

alumnos se lo preguntaran y porque ella misma deseaba entenderlo, fundamentalmente. Koyré (1977) expresa que “es muy difícil de decir, porque lo que él mismo nos cuenta no lleva a su astronomía”. Copérnico dice que encontró testimonios relativos a los autores antiguos que habían intentado explicar las cosas de un modo distinto a como lo hace Ptolomeo, proponiendo hacer del Sol el centro de los movimientos de los planetas inferiores (Venus y Mercurio), y que se dijo a sí mismo que se podía intentar hacer lo mismo para los otros. Koyré piensa que las razones de Copérnico fueron estéticas o metafísicas, por consideraciones de armonía, y no del todo científicas. Siendo el Sol la fuente de la luz, y siendo la luz lo más bello y mejor del mundo, le parecía conforme a la razón que rige al mundo y que lo crea, que esta luminaria estuviera colocada en el centro del universo que se encarga de iluminar. Copérnico lo dice expresamente y no hay razón para no creer en su admiración por el Sol si se tiene en cuenta que Kepler, quien inaugura en realidad la astronomía moderna, es todavía más “heliólatra” que Copérnico.

¿Es finito o infinito el mundo de Copérnico? Koyré (1979) expresa que el mundo de Copérnico es aún un mundo finito. Esta finitud puede parecer ilógica ya que siendo su movimiento conjunto la única razón para aceptar la existencia de la esfera de las estrellas fijas, al negar Copérnico su movimiento por considerarlo aparente y originado por la rotación de la Tierra sobre su eje, es lógico que se niegue la existencia misma de tal esfera. Además, como según la concepción Copernicana las estrellas fijas deben ser extraordinariamente grandes, sería razonable suponer que el volumen de la esfera de las estrellas fijas se extendería indefinidamente “hacia arriba”. Pero, Copérnico creía en la existencia de las esferas planetarias materiales porque las necesitaba para explicar el movimiento de los planetas y sería razonable suponer que creyese también en la esfera de las estrellas fijas que. La esfera estelar, “que abarcaba y contenía todo en sí misma”, le permitía asignar al Sol una posición determinada: el centro de la esfera. Nunca expresa que “el mundo visible”, el mundo de las estrellas fijas, sea infinito, sino tan sólo que es inmedible por ser muy grande. Con toda esta argumentación, Koyré concluye:

“Hemos de admitir los elementos de juicio: el mundo de Copérnico es finito. Además, parece psicológicamente muy normal que la persona que dio el primer paso, el de detener el movimiento de la esfera de las estrellas fijas, dudase antes de dar el segundo, consistente en disolverla en un espacio sin límites. Bastante era para un hombre solo mover la Tierra y ensanchar el mundo hasta hacerlo inmensurable; pedirle que lo hiciese infinito sería claramente pedirle demasiado.”(Koyré, 1979)

## Giordano Bruno y el paso decisivo. El universo infinito

Giordano Bruno nació en 1548 en Nola, cerca de Nápoles; en 1566 se hizo dominico. Diez años más tarde, debido a sus opiniones un tanto heréticas sobre la transubstanciación y la Inmaculada Concepción, tuvo que dejar no sólo la orden sino también Italia. En 1581 llegó a París donde dictó clases y escribió algunas obras filosóficas y una comedia satírica. En 1583 pasó a Inglaterra, donde también dio clases y escribió algunas de sus mejores obras, como “Del infinito universo y el mundo”. Desde 1585 hasta 1592 vagó por Europa, año en que aceptó una invitación para ir a Venecia. Allí fue denunciado y detenido por la Inquisición, luego fue conducido a Roma donde permaneció encarcelado durante siete años hasta ser excomulgado y quemado en la hoguera en 1600.

Hasta hace poco, se aceptaba universalmente que Bruno fue el primero en dar el paso decisivo que Copérnico no había dado: afirmar que la esfera celeste, la esfera de las estrellas fijas de la astronomía copernicana, no existe y que los cielos estelares, en los que se hallan las estrellas a diversas distancias de la Tierra, se extiende infinitamente hacia arriba. Pero, a partir de 1934 se considera que tal honor, al menos en parte, debe atribuirse a Thomas Digges. No obstante esto, se tiene a Giordano Bruno como el principal representante de la doctrina del universo descentralizado, infinito e infinitamente poblado; ya que no sólo la predicó por el occidente europeo con el fervor de un misionero sino que además fue el primero en enunciar plenamente las bases que iban a permitir su aceptación por el público general.

Su universo es descentralizado e infinito. A la vieja y famosa cuestión que por qué no ha creado Dios un mundo infinito, Bruno responde, y es el primero que lo hace, que Dios lo ha hecho, es más, que Dios no hubiera podido hacerlo de otro modo. El Dios de Bruno no hubiera podido sino explicarse y autoexpresarse en un mundo infinito, infinitamente rico e infinitamente extenso. Su universo es infinitamente poblado. Estimado lector, en nuestra época en la que el descubrimiento de exoplanetas nos sorprende, las palabras de Bruno parecen proféticas; expresaba que hay innumerables cuerpos como nuestra Tierra y otras tierras, nuestro Sol y otros soles, todos los cuales giran dentro de este espacio infinito a través de espacios finitos y determinados o en torno a sus propios centros. También explica que no vemos los otros cuerpos brillantes que constituyen las tierras que circulan en torno a los cuerpos brillantes que son los soles debido a que nos resultan invisibles por ser mucho menores.

Koyré atribuye a Bruno el desplazamiento decisivo del conocimiento sensible al intelectual, quién dice, al respecto, que ningún sentido corporal puede percibir el infinito. De aquí que se haya de proceder con cierta mesura a la hora de exigir testimonio a nuestra percepción sensible, pues sólo es admisible por lo que respecta a los objetos sensibles e, incluso en tal caso, no se halla por encima de toda sospecha, a menos que se presente ante el tribunal asistido por el buen juicio. Puesto que tenemos la experiencia de que la percepción sensible nos engaña en lo que atañe a la superficie de este globo sobre el que vivimos, muchas más sospechas hemos de abrigar aún por lo que respecta a la impresión que nos suministra de un límite de la esfera estelar.

Los argumentos de Giordano Bruno para proclamar la infinitud del universo son metafísicos, no científicos. Su visión del mundo es vitalista, mágica; sus planetas son seres animados que se mueven libremente a través del espacio según su propio entender, a la manera de los de Platón. Bruno no tiene una mentalidad moderna, pero su concepción es tan poderosa y profética, tan razonable y poética que no se puede dejar de admirarla. Además, ha influido profundamente sobre la ciencia y la filosofía modernas. No era un astrónomo sino un metafísico cuya visión del mundo se adelanta a la ciencia de su tiempo.

## Kepler. La armonía matemática del mundo

Johannes Kepler nació en Weil der Stadt y murió en 1630 en Regensburg, Alemania. Vivió en épocas de gran turbulencia religiosa, por ser luterano fue perseguido por la contra-reforma y al mismo tiempo, por pertenecer a una corriente de luteranismo poco ortodoxa, le fue negada la comunión en la iglesia luterana. Además, tuvo problemas familiares y económicos serios. Ingresó a estudiar teología en la Universidad luterana de Tubingen, además cursó matemáticas, astronomía y física, así como ética, dialéctica, retórica, griego y hebreo. Los textos de Kepler reflejan la personalidad del autor, su lenguaje y estilo son de una dificultad y minuciosidad inimaginables. Fue un místico atormentado que realizó sus grandes descubrimientos en un misterioso andar a tientas; tratando de demostrar una cosa, descubrió otra, y en sus cálculos cometió errores que se anularon entre sí.

Era un fervoroso partidario del sistema heliocéntrico copernicano por su armonía y simplicidad. Su obra estuvo fuertemente influida por el punto de vista metafísico asociado a la tradición pitagórica y neoplatónica; aún así era aristoté-

lico, no por lo que atañe a la concepción de ciencia sino en lo que respecta a su concepción del ser y del movimiento.

Para Kepler, aún más que para Copérnico, la directriz de la mente divina era el orden geométrico y las relaciones matemáticas, que estaban expresadas en las características del sencillo esquema heliocéntrico. Entre sus primeras publicaciones se encuentra un intento de ligar los seis planetas conocidos y sus distancias al Sol con los cinco sólidos regulares que habían descubierto los geómetras griegos: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro. Kepler sostenía que las seis órbitas planetarias podrían estar separadas por los cinco sólidos regulares. El primer sistema kepleriano fue el siguiente: Esfera de Saturno, Cubo; Esfera de Júpiter, Tetraedro; Esfera de Marte, Dodecaedro; Esfera de la Tierra, Icosaedro; Esfera de Venus, Octaedro; Esfera de Mercurio.

Como resultado de este trabajo, Kepler fue reconocido como hábil matemático y conocedor de astronomía y con este antecedente el astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) le ofreció el cargo de ayudante suyo. ¿Quién fue Tycho Brahe? Fue un reformador de la observación astronómica, con el uso de instrumentos de gran tamaño y bien contruidos había aumentado a tal punto la exactitud de las observaciones de posiciones planetarias y de la ubicación relativa de las estrellas que habría de resultar evidente que ni el sistema de Ptolomeo ni el de Copérnico predecían correctamente las configuraciones celestes. Pasó su vida registrando observaciones, noche tras noche, más de veinte veces mejores que las de Copérnico, cuando aún no se había inventado el telescopio. Desarrolló un sistema propio, geocéntrico y con órbitas circulares, distinto al copernicano

Después de la muerte de Tycho, Kepler continuó con las observaciones y con el análisis de la gran cantidad de datos recopilados. El propósito de sus trabajos era la construcción de unas tablas astronómicas de los movimientos planetarios mejores que las que entonces existían, construidas sobre los datos poco precisos de la época del propio Copérnico. Expuso los primeros resultados en un libro titulado "Comentarios sobre los movimientos de Marte", publicado en 1609, el mismo año en que Galileo apuntó por primera vez su telescopio al cielo. Había hecho setenta intentos distintos para adaptar los datos de Tycho a los epiciclos copernicanos y a los círculos de éste, siempre sin lograrlo. Era necesario, evidentemente, renunciar a todos los métodos entonces aceptados para calcular órbitas planetarias, o bien rechazar como incorrectas las observaciones de Tycho. Nos dice Cohen (1977) que el fracaso de Kepler no debe parecernos tan infortunado como él mismo lo creía. Intentó ajustar los nuevos datos de la órbita de Marte a un sistema de Copérnico con movimiento circular simple. Después de cuatro

años de trabajo encontró que esto no podía hacerse aunque se usasen ecuantes. Los nuevos datos colocaban la órbita ocho minutos de arco fuera del esquema de Copérnico. El mismo Copérnico nunca esperó lograr una exactitud superior a diez minutos y no daba importancia a la discrepancia que luego encontró Kepler porque sabía que sus observaciones tenían errores dentro de ese orden.

Pero Kepler sabía que las observaciones realizadas por Tycho y sus soberbios instrumentos daban medidas con un margen de error menor que esos ocho minutos. Con una integridad, característica del científico, frente a los hechos cuantitativos, no pretendió ocultar la fatal diferencia mediante el uso de hipótesis *ad hoc*. Para él, estos ocho minutos significaban que el esquema de Copérnico, al que había adherido y tanto admiraba, fallaba para explicar el movimiento real de Marte cuando las observaciones de aquél movimiento se hacían con suficiente precisión. En el siguiente apartado retomaremos este asunto y analizaremos el gran paso que dio Kepler al adoptar una nueva actitud ante los hechos observados, sentando los precedentes de la ciencia moderna.

Terminemos, por ahora, con el relato sobre su vida y obra. En 1610 llegaron las noticias de las observaciones de Galileo: las lunas de Júpiter, la superficie rugosa de la Luna y que la Vía Láctea está compuesta por miles de estrellas. La validez de estos descubrimientos no fue aceptada inmediatamente, pues observar estos fenómenos con el telescopio requería gran pericia y agudeza visual además de romper con los esquemas previos. Como Matemático Imperial en la corte del Emperador Rodolfo II en Praga, cargo en el que reemplazó a Tycho Brahe a su muerte, la opinión de Kepler tuvo mucho peso en estos debates. Recibió las noticias con gran entusiasmo y fue la primera voz pública de una autoridad científica reconocida que defendió a Galileo. Al leer un ejemplar del libro de Galileo, que le fue prestado por el emperador, Kepler respondió a Galileo con una carta que publicó bajo del título de *Dissertatio cum nuncio sidereo* en la que expresaba que a pesar de no disponer de un telescopio para verificar las observaciones apoyaba que éstas fueran plausibles. Recién el verano de ese mismo año pudo observar con sus propios ojos tal portento, pues el Duque de Bavaria le prestó su telescopio.

En 1612 Kepler se mudó a Linz donde trabajó durante 14 años. En esa ciudad escribió y publicó las obras *Epitome Astronomiae Copernicanae* (Epítome de la Astronomía Copernicana) y *Harmonice Mundi* (Armonía de los mundos). La primera es un tratado en varios libros que fueron publicados por partes y que representan sus ideas ya más asentadas y maduras sobre la astronomía copernicana, la segunda fue una exploración de la naturaleza armoniosa y divina de los cielos, en una síntesis de geometría, música, astrología, astronomía y epistemología.

En 1626 Kepler se trasladó de Linz a Ulm donde finalmente terminó las *Tabulae Rudolphinae*. Este trabajo monumental, basado en las observaciones de Tycho y bajo la formulación de las órbitas elípticas, es principalmente un conjunto de tablas y reglas para calcular las posiciones de los planetas, además contiene las posiciones de 1055 estrellas. Estas tablas astronómicas le aseguraron la fama pues fueron las más extensas y de mayor exactitud hasta ese momento; debido a éstas, muchos astrónomos del siglo XVII leyeron sus otras obras. Esta obra fue durante más de un siglo referencia obligada para el estudio del cielo, tanto para planetas como para estrellas.

## Las tres leyes de Kepler

Kepler escribió que era imposible despreciar aquellos ocho minutos y que eso bastaba para mostrarle el camino hacia la completa reforma de la astronomía. Siguieron años de continua labor dedicados al estudio la trayectoria de los planetas según la imagen heliocéntrica, finalmente descartó la idea de Copérnico de que todas las órbitas planetarias debían tener su centro en el centro de la órbita terrestre y ser circulares. Si se admitía que la elipse, cuyas propiedades ya eran conocidas por los matemáticos del siglo II a. C., era la trayectoria "natural" de los cuerpos celestes, se obtenía un esquema geométrico del mundo de gran simplicidad en el cual todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en uno de sus focos. Este principio se conoce como la primera ley de Kepler.

Esta es una ley empírica, resultado del análisis de hechos observados. Describe la trayectorias de los planetas, todas sus posibles localizaciones, pero no nos dice cuándo estará en cualquiera de esas posiciones; nos da la forma de una órbita cualquiera, pero no dice nada de la velocidad variable con que el planeta la recorre. Se conocía ya que el Sol, en su movimiento aparente anual, se movía o parecía moverse más rápido a través de las estrellas en verano para nuestro hemisferio sur que en invierno. Se necesitaba una relación entre la velocidad y la posición y había que establecerla a partir de un voluminoso conjunto de datos. El derrotero que siguió Kepler para encontrarla, lo dicen Holton y Brush (1993), fue asombroso: a partir de tres hipótesis incorrectas dedujo un resultado correcto. Una de esa hipótesis se derivaba de una noción aristotélica aceptada en la época de Kepler: la velocidad es proporcional a la fuerza neta, incompatible con la física moderna. Formula así lo que hoy llamamos segunda ley de Kepler o ley de igualdad de las áreas diciendo que una recta trazada desde un planeta hasta el Sol barre áreas iguales en iguales intervalos de tiempo; resulta de ella que un planeta se

mueve con mayor rapidez en el perihelio, cuando más cerca se encuentra del Sol, que en el afelio, cuando está más alejado del Sol. La segunda ley tiene el mismo objetivo que el ecuante.

La primera y la segunda ley fueron publicadas en 1609, en el libro *Astronomía Nova* (Nueva Astronomía). Pero, faltaba una relación entre los movimientos de los distintos planetas; Kepler buscaba una regla, utilizando la teoría musical, como los partidarios de Pitágoras, que estableciera la conexión entre las órbitas planetarias y las notas musicales. La que hoy llamamos tercera ley de Kepler o ley armónica enuncia una relación entre los períodos con que los planetas describen sus órbitas alrededor del Sol y sus distancias medias a dicho astro. En terminología moderna, si  $T$  es el período de un planeta dado y  $R$  el radio medio de su órbita, entonces  $T^2 = K \cdot R^3$ , donde  $K$  es una constante que tiene el mismo valor para todos los planetas. La ley expresa que una vez elegida la distancia, la velocidad queda determinada, y viceversa. El libro en el que anunciaba esta ley se llamó "Las armonías del mundo" (1619).

Finalmente, Kepler pensaba que el Sol suministra la fuerza rectora que mantiene a los planetas en movimiento y creía que la acción del astro rey era en parte magnética, inspirado por el trabajo de William Gilbert (1544-1603) sobre el magnetismo terrestre.

El aporte más importante de Kepler tiene que ver con las dos características de su obra, según Holton y Brush (1993). Una, que ya mencionamos, es la nueva actitud ante los hechos observados. La otra es la formulación matemática de sus leyes, utilizando el lenguaje de la geometría y el álgebra. En éste sentido, la ciencia de Kepler fue totalmente moderna ya que, en primer lugar acepta como árbitro implacable y supremo de toda teoría física a la evidencia que proporciona la observación realizada de un modo preciso y cuantitativo; en segundo término, no considera que los planetas se muevan en sus órbitas a causa de su naturaleza o influencia divina, como enseñaban los escolásticos, ni que sus formas esféricas sirviesen de explicación autoevidente a sus movimientos circulares, como en el pensamiento de Copérnico. El magnetismo no explica las leyes de Kepler pero él anticipó el tipo de explicación que Newton iba a establecer para las fuerzas gravitatorias. El trabajo de Kepler anuncia el cambio hacia la moderna actitud científica: considerar que una amplia variedad de fenómenos están explicados cuando todos ellos puedan describirse mediante un modelo simple y, preferiblemente, matemático.

¿Es finito o infinito el mundo de Kepler? Koyré (1979) sostiene al respecto que la concepción de la infinitud del universo es una doctrina puramente me-

tafísica que puede perfectamente, como ocurrió de hecho, servir de base de la ciencia empírica, y que nunca se puede sustentar desde el empirismo; que Kepler así lo comprendió y, por lo tanto, la rechazó. En lo que respecta a las razones metafísicas por las cuales Kepler niega que el universo sea infinito, éstas se deben principalmente a sus creencias religiosas. Ve en el mundo una expresión de Dios e incorpora en su estructura un orden y armonía matemáticos; orden y armonía que no se pueden encontrar en el universo infinito y por tanto, informe (uniforme) de Bruno. Sin embargo, la razón que opone a Bruno y a quienes comparten sus puntos de vista no es esta concepción de la acción creadora de Dios, sino una concepción de la ciencia astronómica basada en los hechos, en el mundo que vemos. Expresa que “Ciertamente uno se encuentra errando en esta inmensidad a la que se le niegan límites y centro y, por ende, todo lugar determinado”. Es decir, un universo finito tiene un centro; además, este universo de Kepler es no uniforme, no homogéneo y, por lo tanto, el lugar en que nos hallamos es peculiar.

## Galileo y el telescopio

En 1609 un hombre comenzó a usar el telescopio para el estudio sistemático del cielo. Sus revelaciones demostraron que Ptolomeo había cometido errores importantes y que el sistema copernicano parecía concordar con las nuevas observaciones. La comprobación de que el sistema heliocéntrico tenía una base en la realidad propulsó la búsqueda de una física aplicable tanto a la Tierra como al universo. El hombre de ciencia a quien se debe la introducción del telescopio como instrumento científico y que estableció los fundamentos de la nueva física fue Galileo Galilei.

Nació en Pisa, Italia, en 1564 y murió en 1642. Su padre fue un pobre pero noble florentino de quién adquirió un competente gusto por la poesía, la música y los estudios clásicos. Inició estudios de medicina en la universidad de Pisa, luego se dedicó a las ciencias físicas. Sus rasgos característicos nos muestran una independencia de espíritu y una inteligencia inquisitiva y rápida no suavizada por el tacto o la paciencia, se destacaba desde muy joven por su desafío constante a las opiniones autoritarias de sus mayores. En 1590 realizó el experimento público sobre las velocidades de pesos desiguales dejados caer desde la torre inclinada de Pisa, aunque lo más probable es que la historia sea una leyenda y se tratase de un experimento mental.

Hizo su primera contribución a la astronomía antes de usar el telescopio. En 1604 apareció en la constelación Serpentario una *nova* o nueva estrella. Galileo demostró que se trataba de una verdadera estrella, ubicada en los espacios celestes y no dentro de la esfera de la Luna; es decir, determinó que la nueva estrella no presentaba paralaje medible y, por lo tanto, estaba muy alejada de la Tierra. Con esto probó que podía haber cambios en los cielos a pesar de lo que sostenía Aristóteles, quien aseguraba que los cielos eran inmodificables y limitaba a la Tierra y sus cercanías la zona donde podían producirse cambios. Su demostración pareció a Galileo tanto más decisiva por cuanto se trataba de la segunda nova observada sin que se hubiera podido medir paralaje alguna. La anterior, aparecida en 1572 en la constelación de Casiopea, había sido estudiada por Tycho Brahe; rivalizó en magnitud con Venus y luego se desvaneció gradualmente, brilló durante dieciséis meses.

La primera evidencia de que Galileo había aceptado el sistema de Copérnico se encuentra en dos cartas escritas en 1597, una de ellas a Kepler en respuesta al libro de este último, *Mysterium Cosmographicum*, de 1576. Le expresaba que había sido partidario de Copérnico durante varios años y que había encontrado varios argumentos físicos a favor del movimiento de la Tierra. Pero Galileo prestó poca atención a los detalles del trabajo de Kepler sobre las órbitas planetarias y nunca adoptó la elipse kepleriana en lugar del círculo.

En 1609, Galileo supo que cierto flamenco había construido un anteojo mediante el cual los objetos visibles pero muy distantes se ven claramente como si estuvieran muy cerca; construyó el suyo en base a la teoría de la refracción, utilizó dos lentes de vidrio, ambas planas por una cara, mientras por la otra una lente era esféricamente convexa y la otra cóncava. Apuntó su telescopio al cielo y a partir de ese hito quedaban dos posibilidades a los hombres de ciencia: negarse a mirar por el telescopio o rechazar la física de Aristóteles y la astronomía de Ptolomeo. La ciencia atravesaba una etapa de crisis profunda, el paradigma aristotélico tolemaico sería sustituido en un proceso que culmina con la obra de Newton. Galileo marcaría con su introducción en la actividad científica uno de los cambios más profundos en la práctica de la misma. Sus estudios sobre el movimiento de los proyectiles, la caída libre de los cuerpos, el movimiento del péndulo y la inercia de los cuerpos se convirtieron en la génesis de un método que se instalaría para siempre entre los científicos, el método hipotético deductivo.

Veamos qué es lo que propone Galileo. Al discutir el famoso ejemplo de la piedra que cae desde lo alto del mástil del navío en movimiento, explica el principio de relatividad física del movimiento y luego, sin hacer ninguna mención de

la experiencia, concluye que el movimiento de la piedra con relación al navío no cambia con el movimiento de este último. Su adversario aristotélico, empirista, le pregunta si hizo él el experimento; él responde que no necesita hacerlo. Galileo está convencido de que la buena física se hace *a priori*; la teoría precede al hecho; antes de toda experiencia poseemos ya el conocimiento que buscamos. Las leyes fundamentales del movimiento son de la misma naturaleza que las que gobiernan las relaciones y leyes de las figuras y números. Las encontramos y construimos no en la naturaleza sino en nosotros mismos, como Platón nos ha enseñado. Y por eso, proclama Galileo, somos capaces de dar pruebas puras y estrictamente matemáticas de las proposiciones que describen los movimientos observados y desarrollar el lenguaje de la ciencia natural, interrogar a la naturaleza mediante experimentos contruados de modo matemático y leer en el gran libro de la naturaleza, que está escrito en caracteres geométricos.

La prolífica obra de Galileo ha merecido libros enteros entre los historiadores, epistemólogos y filósofos de la ciencia, en nuestro caso nos abocaremos a la intervención crucial que tuvo en la Astronomía al usar por primera vez el telescopio para observar los cielos.

## Las evidencias observacionales del sistema copernicano

En 1610 Galileo publicó un libro titulado *Sidereus Nuncius*, que puede traducirse como Mensajero Celestial que describe los descubrimientos que había hecho con el telescopio. Observó al planeta Júpiter con cuatro planetas más pequeños que giran a su alrededor. Después fueron llamados satélites por Kepler y otros astrónomos y hoy sabemos que Júpiter tiene al menos doce. La existencia de tan solo uno de ellos era un golpe a las ideas tradicionales por dos razones; una de ellas era que, muchos filósofos estaban convencidos de que existían exactamente siete cuerpos celestes. Otra razón, es que mientras todos los restantes objetos celestes parecían girar alrededor de la Tierra, los satélites de Júpiter giraban a su alrededor; por lo tanto, la Tierra no era el centro de rotación de todos los cuerpos del Universo.

Vio que la superficie de la Luna no es lisa, uniforme y perfectamente esférica como creían un gran número de filósofos (también lo creían de otros cuerpos celestes), sino desigual, rugosa y llena de cavidades y prominencias, como la superficie de la Tierra, y algunas de las montañas tienen seis kilómetros de altura. Las estrellas fijas no parecen mucho mayores cuando se observan a través del telescopio, casi todas se ven como puntos luminosos. Galileo llegó a la conclusión

de que su tamaño aparente, visto a ojo desnudo, era confusamente grande. Se las puede imaginar increíblemente alejadas sin necesidad de atribuirles un tamaño inmenso, lo que tiene que ver con el problema de la ausencia de paralaje. La Vía Láctea, que aparece como una región continua de luz a simple vista, se descompone mediante el telescopio en miles de estrellas individuales. Tales hechos no podrían explicarse fácilmente por quienes creen que el Universo se había creado exclusivamente en beneficio del hombre. ¿Por qué Dios pondría cosas invisibles en el cielo?

Muchos de sus contemporáneos no aceptaron la validez científica de sus descubrimientos realizados utilizando el telescopio, se sabía que con lentes se podía realizar trucos visuales. Ya vimos que el único científico que apoyó públicamente a Galileo en su tiempo fue Kepler. Galileo pensaba que los opositores a la teoría heliocéntrica verían, como con sus propios ojos, lo absurdo de las objeciones hechas al sistema de Copérnico; pero los hombres creen solamente lo que están dispuestos a creer. Estaban convencidos de hallarse adheridos con seguridad a los hechos, de que la teoría heliocéntrica era evidentemente falsa y estaba en contradicción tanto con las observaciones de los sentidos como con el sentido común, además de las herejías teológicas implícitas en el modelo heliocéntrico.

¿Es finito o infinito el Universo de Galileo? Koyré (1979) expresa que en el debate acerca de la finitud o infinitud del Universo, el gran florentino se abstiene de tomar partido. Parece no haber llegado a una conclusión sobre el asunto e incluso parece considerar la cuestión como insoluble, aunque se inclina por la infinitud. No admite, en contradicción con Ptolomeo, Copérnico y Kepler, la limitación del mundo o su encarcelamiento en una esfera real de estrellas fijas y también rechaza la idea de que el universo posea un centro en el que se sitúe la Tierra o el Sol.

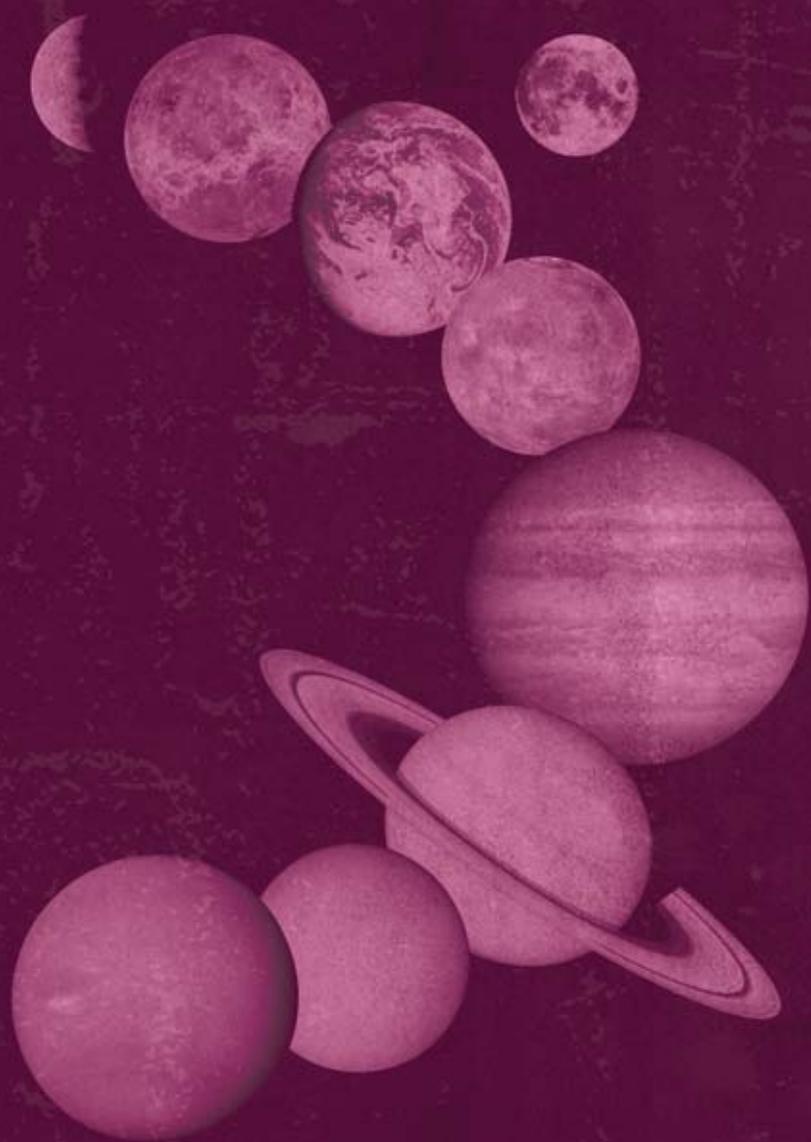
## Llegamos al final de nuestro recorrido histórico

La Inquisición advirtió a Galileo en 1616 que dejara de enseñar la teoría de Copérnico pues se consideraba contraria a las Sagradas Escrituras. Mientras Copérnico había invocado todavía la doctrina de Aristóteles para hacer plausible su teoría, Galileo no podía suprimir lo que él profundamente creía era la verdad. Urgía la aceptación del sistema heliocéntrico por sus propias características de simplicidad y utilidad, sin que tuvieran que ver en las mismas cuestiones como la fe y la salvación. Ésta fue la gran ruptura. En 1632, después de hacer los cambios requeridos, obtuvo el permiso de la Inquisición para publicar el trabajo "Diálogo

sobre los dos grandes sistemas del mundo”. Posteriormente a la publicación los inquisidores se dieron cuenta que había intentado soslayar la advertencia de 1616. Además, las opiniones expresadas por Galileo y el deseo de la Inquisición de demostrar su poder ante la herejía se unieron para llevarle al castigo.

Galileo, en realidad, era muy devoto. En sus cartas de 1613 y 1615 expresaba que la mente divina contiene todas las leyes naturales y que las ojeadas ocasionales de éstas que el investigador humano puede lograr laboriosamente constituyen pruebas y revelaciones directas de la divinidad tan válidas y grandiosas como las que figuran en la Biblia. Estas opiniones pueden considerarse síntomas de panteísmo, una de las herejías por las cuales Giordano Bruno había sido quemado en el patíbulo en 1600. Galileo no ayudó a su causa, pronunciando frases como las del cardenal Baronius: “El Espíritu Santo intentó enseñarnos en la Biblia cómo ir al cielo, no cómo los cielos van”. Sobrevino la tragedia para Galileo; viejo y enfermo, fue llamado a Roma y confinado durante unos meses. Fue juzgado en ausencia, amenazado con tortura, inducido a juramento de que renunciaba a la teoría de Copérnico y, finalmente, sentenciado a confinamiento perpetuo.

Galileo constituye un ejemplo para la humanidad de que la demanda de obediencia espiritual e ideológica lleva consigo la obediencia intelectual. Su “Abjuración” fue mandada a leer desde los púlpitos en toda Italia y hecha pública como una advertencia. Pero la historia se ha encargado de mostrar que la ciencia no puede florecer sin libertad. La lucha del autoritarismo contra la ciencia, de la ignorancia contra el conocimiento, no ha disminuido desde los tiempos de Galileo. Aunque el Vaticano no anunció hasta 1968 que podía ser adecuado revocar la condena de 1633, afortunadamente las consecuencias científicas de su trabajo no se retrasaron tanto. Antes de transcurridos cincuenta años de la muerte de Galileo apareció el gran libro de Newton, *Principia*, que integraba brillantemente el trabajo de Copérnico, Kepler y Galileo con los principios de la mecánica.



## CAPÍTULO 2

# El Universo del Big Bang

Daniel Stigliano

*“Tengo la impresión al leer esta página, de que ya he leído algunas de las palabras que figuran en ella; y recuerdo frases casi idénticas que he visto en otra parte. Me parece incluso que aquí se habla de algo que ya he mencionado en estos días... pero no puedo recordar de qué se trata. Tal vez tenga que leer otros libros.*

*¿Cómo? ¿Para saber qué dice un libro debéis leer otros?  
A veces es así. Los libros suelen hablar de otros libros”.*

*(Diálogo entre Fray Guillermo y su discípulo Adso en El nombre de la Rosa de Umberto Eco, 1980)*

## La humanidad y la indagación del cosmos

Los seres humanos tenemos una gran capacidad para asombrarnos de los fenómenos que percibimos en nuestro entorno. A veces preguntamos por simple curiosidad y nos contentamos con una respuesta general, pero cuando estamos muy interesados nuestra actitud se transforma. Si no nos conforma la primera contestación preguntamos más y si todavía se presentan dudas o no lo comprendemos todo seguimos indagando hasta que una nueva respuesta nos satisfaga.

Como hemos visto en el capítulo anterior, los primeros temas que la humanidad trató de esta manera fue el estudio de los astros. Quizás todo comenzó por

casualidad cuando los cazadores primitivos dirigieron su mirada al cielo nocturno y comenzaron a reconocer configuraciones de estrellas sencillas de recordar pero si de algo somos conscientes es que la humanidad ha necesitado muchos siglos para construir un modelo del universo y en este devenir ha tenido que desechar muchas de sus hipótesis. Lo cierto es que no estamos en condiciones de asegurar que no cambiará nuestro esquema actual del cosmos dado que el progreso del pensamiento científico, inevitablemente se ocupará de hacerlo en algún momento. No obstante ello, partimos de entender que un modelo es una representación que intenta aproximarse a la realidad, en continua evolución el cual se construye a partir de toda la información con la que se cuenta hasta el día de formularlo.

En 1952, los astrofísicos norteamericanos George Gamow y Ralph Alpher, basándose en los trabajos de Georges Lemaître (1931) desarrollaron una teoría sobre la creación de los elementos químicos, basada en la explosión de un átomo originario. Estos trabajos son los que conocemos popularmente como *Teoría del Big Bang*. Esta línea de investigación, parte del supuesto que el ordenamiento actual del Universo es el resultado de una gran explosión primitiva. La siguiente comparación puede ayudarnos a comprender esta postura: cuando estalla una bomba tiene lugar una potente explosión, un relámpago luminoso y la fragmentación de la envoltura del artefacto en millones de pequeños fragmentos que se proyectan hacia todas las direcciones. Después de un intervalo de tiempo muy corto, las fracciones que se mueven a mayor velocidad se alejan del centro de la explosión mucho más rápido que aquellas que salieron impulsadas a menor velocidad. Este efecto expansivo se sigue observando hoy en el espacio.

Otras corrientes, como por ejemplo, la de los astrónomos británicos Herman Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle (1955), autores de la *Teoría del Estado Estacionario*, explican la expansión del Universo sin recurrir a aquella explicación controvertida. Como dato anecdótico, fue el último de estos tres científicos de Cambridge, el que acuñó irónicamente la expresión *Big Bang* al referirse a la teoría de Gamow.

Por esta razón, los astrónomos en la actualidad prefieren mantener la cautela en virtud que no se ha podido demostrar mediante comprobaciones empíricas que esta explosión haya tenido lugar realmente. Sin embargo, en la comunidad científica prevalece el consenso de la existencia de numerosos indicios que conducen a pensar que la estructura y el comportamiento del cosmos son el resultado de un fenómeno expansivo como el que acabamos de describir con la comparación de las "esquirlas" que se distribuyeron por el espacio. De modo tal, que todo este proceso primordial, cualquiera haya sido el mecanismo que lo desencadenó, aún no ha dejado de producir su efecto en el cosmos. En el capítulo

siguiente se describirán con mayor detalle los fundamentos observacionales que sostienen esta teoría.

Estas teorías que intentan dar cuenta de la expansión que se observa en el Universo, también nos conducirán a reconsiderar los conceptos de espacio y de tiempo. En la inmensidad del infinito, ambas magnitudes no se asemejan a lo que concebimos como tiempo y espacio en nuestra cotidianeidad planetaria.

En este escrito, nos preguntaremos muchas de las cosas que el hombre se cuestionó a lo largo de la historia acerca del cosmos y trataremos de responderlas a partir de las hipótesis y las teorías que surgen de las últimas investigaciones en el campo de la Cosmología. En este sentido, partiremos desde nuestro planeta y su sistema estelar para recorrer luego las estructuras que habitan la inmensidad del Universo hasta las fronteras del infinito y formular, entre otras preguntas: ¿qué tamaño y qué forma presenta el Universo? ¿Cuáles son las estructuras que lo conforman? ¿Dónde se encuentran? ¿Cómo se originan y cómo desaparecen? ¿Cómo se miden las distancias que las separan? ¿Cuánto se tardaría en recorrer esos trayectos con los medios tecnológicos desarrollados por la Humanidad?

Además, considerando que este desarrollo está dirigido a educadores y futuros educadores intentaremos imprimir a lo largo del escrito algunas marcas textuales que refieran a cuestiones vinculadas con la Didáctica de las Ciencias Naturales y, en especial, de aquellos fenómenos que no se pueden observar directamente ni reproducir en un laboratorio. Es así que incluiremos algunos argumentos relacionados con la enseñanza a partir de modelos y analogías, el estímulo de la imaginación, la construcción de las representaciones mentales y los riesgos de la transposición didáctica.

## Las distancias en el universo

La preparación de un viaje requiere anticipar, entre otras cuestiones, a qué distancia se encuentra el destino, cuánto tiempo insumirá el viaje y cuál será el medio de transporte más adecuado para realizarlo. Las distancias interestelares son tan grandes que los astrónomos se vieron en la necesidad de establecer un sistema de medición que permitiera cuantificarlas. Sólo unos pocos ejemplos son suficientes para demostrar que las unidades de longitud del sistema métrico decimal no son útiles para este fin. Sin ir más lejos, en nuestro sistema solar la distancia de la Tierra al Sol es casi 4000 veces mayor que la longitud del ecuador terrestre y la distancia que separa al Sol de Plutón, uno de los planetas enanos

más lejanos, equivale a 150.000 vueltas alrededor de nuestro planeta. Expresar estas dimensiones en kilómetros sólo se prestaría a la confusión, razón por la cual se adoptó como unidad de expresión de las distancias que nos separan del resto del Universo al año luz que equivale a la distancia que recorre la luz en un año. Si consideramos que la luz recorre 300.000 kilómetros por segundo y que un año tiene aproximadamente trescientos sesenta días, se infiere que un año luz encierra la distancia de 9000 millones y medio de kilómetros.

La luz recorre la distancia del Sol a la Tierra en poco menos de ocho minutos y medio, y del Sol a Plutón en cinco horas y media, por eso decimos que el Sol está a ocho y medio minutos luz de la Tierra y que Plutón se encuentra a cinco horas y media luz del Sol. Sin embargo, las cantidades crecen enormemente a medida que nos alejamos de casa. Si consideramos que el trayecto que separa al Sol del último planeta que lo "corteja" equivale al radio de la circunferencia del sistema solar, debemos duplicar dicha distancia para expresar su diámetro, unas 12 horas-luz. La estrella más próxima al Sol, conocida como Alfa del Centauro, no se encuentra ni a segundos, minutos u horas luz, sino a 4,5 años-luz. A pesar de esta distancia, tan difícil de imaginar, podemos verla a simple vista en el cielo nocturno apuntando a la famosa Cruz del Sur.

Cuando recordamos que en un año hay casi 9000 horas, advertimos que el diámetro del sistema solar es insignificante en comparación con la distancia que nos separa de la estrella Alfa del Centauro. Más aún, si consideramos las distancias que nos separan de estrellas aún más lejanas, 4,5 años-luz están sólo "a la vuelta de la esquina". Por ejemplo, entre las estrellas visibles en el cielo del hemisferio sur terrestre, Sirio, que es la más brillante, está a 9 años luz, Capella a 45 años luz y Aldebarán a 68 años luz. Sólo cuando hablamos de estrellas como la Espiga y Antares a 220 y 250 años luz respectivamente, estamos en condiciones de afirmar que se trata de estrellas lejanas.

El lector se debe haber preguntado a esta altura cómo se pudieron determinar estas distancias. Los astrónomos han empleado desde muchos siglos atrás el método de la paralaje. ¿En qué consiste este procedimiento? Supongamos que se quiere medir la distancia entre la Tierra y la Luna. Vista desde el Complejo Astronómico El Leoncito (provincia argentina de San Juan), la Luna se hallará a una determinada posición respecto a las estrellas, que juegan durante la medición un papel de fondo. Pero si la observamos, en el mismo momento, desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata, (provincia argentina de Buenos Aires), ocupará una posición diferente. El procedimiento necesita dos datos, por un lado, el desplazamiento entre las posiciones de la Luna en El Leoncito

y en La Plata y por otro lado, la distancia en línea recta entre ambas localidades. El astrónomo egipcio Claudio Ptolomeo, con ayuda de la trigonometría, fue capaz de resolver esta cuestión en el año 150 d C. Sus conclusiones, bastante cercanas a la medición correcta, arrojaron una distancia de 384.000 km entre ambos objetos celestes. Con los instrumentos de medición con los que contamos en la actualidad sabemos que esta distancia es de 384.400 kilómetros.

En síntesis, se estima que son 90.000 años-luz los que separan a los dos puntos más distantes de nuestra galaxia y que la distancia que separa a una galaxia de la otra es de unos cuatro millones de años luz. Se trata de cantidades incomprensibles para el hombre pero es posible que impresionen muchísimo más a los futuros pioneros del espacio que a nosotros en la actualidad. Es improbable que aún contando con naves que superen la velocidad de la luz logren dar la vuelta al universo, pero suponiendo que alcanzaran su meta, la audacia se pagaría a un precio muy elevado. ¿Por qué?

En primer lugar, nunca podrían encontrar el camino de regreso como consecuencia de la expansión hacia el infinito que se manifiesta en el universo. En 1929, los trabajos del astrofísico estadounidense Edwin Powell Hubble, permitieron determinar una "fuga" de los cuerpos celestes hacia los bordes del Universo y consecuentemente el corrimiento constante de sus límites hacia el infinito. ¿Cómo arribó a esta conclusión?

Una de las herramientas más valiosas con las que cuenta un astrónomo para obtener información acerca de las estrellas lejanas es un instrumento conocido como espectrógrafo. La espectroscopía consiste en hacer pasar un rayo de luz proveniente de una fuente luminosa a través de un prisma, generalmente, a través de una red de difracción. La luz blanca al atravesar este elemento dispersor se descompone en un "espectro" de diferentes colores (llamadas habitualmente longitudes de onda) que representan la emisión o la absorción de la radiación electromagnética producida por los átomos del gas donde la luz incidió. Si un policía de una escena del crimen imaginaria tuviera la posibilidad de encontrar una serie de huellas dactilares, no sólo podría identificar a la persona que las dejó, sino que además podría determinar, si esas impresiones revelan trazas de alguna sustancia en particular, por ejemplo, si se identifican trazas de aceite de automóvil podría inferir que el delincuente estuvo manipulando un motor. Análogamente, el astrofísico puede utilizar a los espectros de la misma manera, ya que estos identifican a los átomos que componen las estrellas, los planetas y las galaxias del mismo modo que las huellas dactilares nos identifican a cada uno de nosotros.

El descubrimiento de Hubble, se basó en este procedimiento; en efecto, mientras examinaba las líneas espectrales de la luz emitida por las galaxias comprobó que las mismas tendían a trasladarse hacia la parte roja del espectro electromagnético, lo cual ocurre siempre que la fuente responsable de tales líneas luminosas se aleja del observador.

En segundo lugar, el trasladarse a una velocidad mayor a la de la luz traería también consecuencias irreparables. Si los cosmonautas tuvieran la posibilidad de regresar al punto de partida no encontrarían a la Tierra tal como la dejaron. Mientras el tiempo habría avanzado miles de siglos en la Tierra para los viajeros el tiempo no se habría alterado. Así pues, un astronauta imaginario con una nave con "cuenta años-luzómetro" tardaría 3 años y siete meses para arribar a Alfa del Centauro, mientras que con una nave espacial movida por energía convencional el mismo viaje tardaría no menos de diez siglos.

La aventura descrita terminaría con el concepto de tiempo tal como lo conocemos y lo percibimos en el entorno cotidiano. Los trabajos de Albert Einstein (1879-1955) arrojaron la hipótesis de que la masa de los cuerpos aumenta con el incremento de la velocidad. Empleando una comparación para comprender mejor este fenómeno podríamos imaginar que a una velocidad próxima a la de la luz, los relojes enlentecen su ritmo de acuerdo con el aumento de la masa de la caja del reloj. Mientras esto ocurre, la tripulación de la nave tampoco lo advierte ya que se aletarga en la misma medida el ritmo de su vida corporal. Como resultado, el tiempo de la Tierra ya no ejerce su influjo sobre los viajeros que ahora transcurren una nueva magnitud: la del espacio-tiempo. Allá arriba, a medida que aumenta la velocidad se alargan las horas tal como las conocemos.

Otro ejemplo puede ayudarnos a imaginar este concepto. La estrella Rigel, en la constelación de Orión, se encuentra a 900 años luz de la Tierra. ¿Qué significa esto? Que la luz que nos llegó anoche de ella comenzó su viaje hace 900 años. Si un habitante de nuestro planeta enfocara un telescopio hacia Rigel captaría una imagen de 900 años de antigüedad y si un habitante de Rigel hiciera otro tanto para enterarse de nuestra existencia, atravesaría la misma experiencia.

Este período de años que requiere la luz para trasladarse de un punto a otro del cosmos determina que los sucesos que ocurren simultáneamente en la Tierra y en Rigel se distancien 900 años. Evidentemente, este desfase espacio-temporal no podría ser corregido por una nave espacial que supere los 300.000 kilómetros por segundo de velocidad.

Existen otras unidades, además del año-luz, para medir las distancias que separan a los cuerpos que habitan el cosmos, ellas son la Unidad Astronómica

(UA) y el Pársec (pc). Una UA equivale a 3,26 años-luz mientras que un pc equivale a 30,86 billones de kilómetros, o bien 3,26 años luz, o 206.265 UA. ¿Por qué, entonces, decidimos emplear como unidad en todos los ejemplos anteriores solamente al año- luz? Por qué estimula la imaginación de los estudiantes y facilita las asociaciones que se necesitan para interpretar el modelo mental de Universo que deseamos que construyan.

No queremos dejar pasar esta oportunidad para introducir en el texto una marca didáctica vinculada a la enseñanza a través de las alegorías y las metáforas. La alegoría es una figura literaria que pretende representar una idea valiéndose de formas humanas, animales o de objetos cotidianos. La comprensión de conceptos como el de espacio-tiempo se puede facilitar recurriendo a imágenes como las que empleamos hace un momento. Todo lo relacionado con la imagen y el concepto se halla representado mutuamente lo uno en lo otro. La imagen es el reflejo, en la conciencia, de las cosas y los fenómenos que existen objetivamente. Podríamos decir que las imágenes son el contenido sensible del pensamiento. “En el pensamiento, la imagen, como reflejo de los fenómenos y las cosas del mundo comprensible en sus diversos aspectos, formas, colores, procesos, asegura una permanente y estrecha conexión del estudiante entre la naturaleza y el pensamiento” (Shardakov, 1968). Es por ello, que cuando los alumnos razonan y resuelven problemas, recurriendo a las alegorías, se produce una unidad entre la imagen y el concepto. La imagen alegórica o la metáfora se convierten, de este modo, en intérpretes de lo conceptual y vehículos que permiten recuperar la información almacenada. Por lo tanto, cuánto más rica y viva sea la imagen que les proporcionemos, más completo será el contenido conceptual que queremos expresarles. No obstante, se debe mantener un equilibrio entre la imagen y los elementos conceptuales-verbales para evitar que en algunos casos, el pensamiento se fragmente en acontecimientos aislados que dificulten la comprensión.

## El Sistema Solar

Al observar la esfera celeste, los astrónomos primitivos llegaron a la conclusión que algunos cuerpos celestes se desplazaban por el cielo mientras que otros se mantenían siempre en la misma posición. A los primeros se los llamó “planetas” y a los segundos “estrellas”. De allí que el origen de la palabra planeta se remonta al término equivalente a “vagabundo” o “errante” en el griego clásico.

En el año 2006, la Unión Astronómica Internacional (UAI), definió las características que debe presentar un cuerpo celeste para que sea considerado un planeta. La primera condición es que el astro debe orbitar alrededor de una estrella, la segunda, que debe presentar una masa mayor que  $5 \times 10^{20}$  kg y tener una forma casi esférica de diámetro superior a los 800 km de modo tal que pueda contar con su propia gravedad. El tercer requisito es que al orbitar no se encuentre acompañado por otros cuerpos similares.

La Tierra cumple con estas tres características, razón por la cual es un planeta que se encuentra a 150.000.000 de kilómetros de la estrella más próxima: el Sol. Nuestra "casa" describe una órbita alrededor del Sol en un año, acompañado de un "cortejo" de muchos otros cuerpos celestes que lo siguen a velocidades diferentes. Entre ellos se destacan otros planetas que repiten el comportamiento de la Tierra pero con rapidez y distancias diferentes. Los planetas de nuestro Sistema Solar, ordenados en función de sus distancias a partir del Sol son los siguientes: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Veremos más adelante que los cuerpos celestes que se encuentran más allá de Neptuno y que se bautizaron con los nombres de Plutón, Caronte, Haumea, Makemake y Eris, son considerados planetas enanos o plutoides desde el año 2008 por la UAI.

Los planetas están conformados por minerales y una atmósfera gaseosa, la cual difiere entre uno de otro y es determinante, junto a la presencia de agua, para la existencia de la vida en sus diversas formas. Ninguno de ellos puede producir luz o calor a diferencia de las estrellas que lo logran a partir de reacciones nucleares. Por lo tanto, los planetas, son visibles porque son capaces de reflejar la luz solar de la misma manera que los espejos.

Los educadores nos quejamos, con frecuencia, de la dificultad que presentan nuestros alumnos para resolver problemas o razonar determinados conceptos. Una educación "problematizadora" (Freire, 1969) incluye también el enseñar a pensar. El empleo de las analogías facilita la comprensión y abre la puerta a la resolución de problemas. ¿Qué es una analogía? Una relación de semejanza entre dos o más cosas diferentes. Por ejemplo: los planetas reflejan la luz como los espejos o las estrellas son gigantescos reactores nucleares. El razonamiento por analogía consiste en arribar a una conclusión a partir de premisas en las que se establece una comparación entre conceptos diferentes. Durante el proceso de resolución, se trasladan las características de un objeto que ya conocemos a otro objeto parecido o semejante que pretendemos conocer. El razonamiento por analogía no nos conduce de lo particular a lo general, como lo hace el razonamiento inductivo, ni nos lleva de lo general a lo particular, como el razonamiento deductivo.

vo sino que se basa en juicios, conceptos o propiedades conocidas y los traslada o confronta con otros juicios, conceptos o propiedades que queremos determinar.

Regresando a nuestro viaje, el planeta más próximo al Sol es Mercurio, que gira a su alrededor a una distancia media de 58 millones de kilómetros y posee un diámetro de sólo dos quintas partes del de nuestro planeta. Hasta el año 1965 se creía que mostraba permanentemente la misma cara hacia el Sol, del mismo modo que ocurre con la Luna respecto de la Tierra, debido a que su período de rotación sobre su eje era igual al que tardaba en describir su órbita. Una experiencia, consistente en enviar impulsos de radar hacia Mercurio, demostró que su período de rotación no era igual a su período de traslación tal como se pensaba. Cómo está más cerca del Sol que la Tierra, a Mercurio lo podemos observar al atardecer o al amanecer ya que tarda mucho menos tiempo en dar una vuelta completa alrededor del Sol y en consecuencia la cantidad y duración de los días mercurianos difieren por completo de los días terrestres.

Lo sigue el planeta Venus a 108 millones de kilómetros de distancia, que por las mismas razones que Mercurio merece la distinción de conocerse como “el lucero del alba”. Gira alrededor del Sol y recorre su órbita en siete meses. El tamaño de Venus es semejante al de la Tierra, no así su atmósfera que además de presentar de manera permanente una capa de nubes tormentosas, está compuesta de gases tóxicos para el hombre como el dióxido de azufre.

Más allá de la Tierra y a 228 millones de kilómetros del Sol, nos encontramos con Marte. Su tamaño es algo superior al de la mitad de la Tierra y necesita casi dos años para recorrer su órbita. La atmósfera marciana está compuesta por un 95 por ciento de dióxido de carbono. Popularmente, recibe el apodo de “Planeta Rojo” debido a la apariencia rojiza que le confiere el óxido de hierro que contiene su suelo.

Si avanzamos un poco más, algo así como 100 millones de kilómetros, nos encontraremos con el cinturón de asteroides, cuerpos celestes que presentan tamaños de menos de 750 kilómetros de diámetro y en consecuencia no cumplen con la definición de planeta. En la misma situación, se encuentran los meteoritos. Fragmentos rocosos que suelen desprenderse del cinturón de asteroides y que se hacen visibles cuando ingresan a la atmósfera terrestre inducidos por la fuerza gravitatoria de nuestro planeta. Cómo se desplazan a muchísima velocidad se registra un fuerte aumento de temperatura cuando entran en contacto con el aire provocando un brillo transitorio que es producto de su propia combustión. En cada punto de la trayectoria la luz que produce el meteorito dura una fracción de segundo pero a menudo en noches claras es posible visualizarlos. Este fenómeno se conoce como “ráfaga meteórica”.

A 778 millones del Sol nos encontramos con Júpiter, el planeta más grande de nuestro sistema estelar. Su diámetro es once veces mayor al de la Tierra y si pudiésemos pesarlo en una balanza su peso sería 300 veces mayor al de nuestra casa. Visto con un telescopio, aparece como un disco cruzado por varias bandas oscuras que son cambiantes, por lo que se supone tiene una atmósfera gaseosa y muy densa.

El siguiente planeta es Saturno. A esta altura tuvimos que recorrer desde el Sol 1430 millones de kilómetros. No es tan grande como Júpiter, aunque es nueve veces y media más grande que la Tierra. Se lo distingue de los demás planetas del sistema solar porque se presenta con un sistema de anillos que lo rodean ecuatorialmente y le confieren un aspecto único al observarlo con el telescopio. Aunque cabe aclarar, que todos los planetas gaseosos, en mayor o en menor medida presentan sistemas de anillos. Los análisis espectroscópicos permiten suponer que los anillos se encuentran compuestos de hielo y que el color rojizo que caracteriza una zona de los mismos podría encontrar su origen en la presencia de polvo cósmico u óxido de hierro.

Los restantes planetas del sistema solar sólo se pueden observar mediante telescopios. Son los casos de Urano y Neptuno. El primero se encuentra a 2870 millones de kilómetros del Sol y Neptuno el siguiente 1500 millones de kilómetros más lejos. Ambos son tres veces y media más grandes que la Tierra.

En 2008, la Unión Astronómica Internacional, definió con término “plutoides” a los planetas enanos que cumplen con los requisitos de la definición de planeta, expresada anteriormente, y cuyo período orbital es superior a la órbita de Neptuno, es decir, que tarda más de dos siglos en dar una vuelta alrededor del Sol. Esta denominación provino de Plutón que fue considerado a partir de su descubrimiento, en 1930, y por casi ochenta años el último planeta del sistema solar. Se trata de un planeta enano esférico que inicia la serie de los plutoides compuesta por Plutón, Caronte, Haumea, Makemake y Eris. Actualmente, se están descubriendo más cuerpos celestes que en el futuro próximo serán clasificados como plutoides. Una característica que presentan en común es que su órbita se aleja mucho de la circular por lo tanto tienen una elevada excentricidad e inclinación sobre el plano de la eclíptica del sistema solar.

Hasta aquí sólo mencionamos a los grandes planetas del sistema solar, a los planetas enanos, a los plutoides y a los asteroides. Si nuestra nave imaginaria lo atravesara nuestro sistema planetario desde el Sol hasta sus límites, veríamos que algunos planetas cuentan con números variables de minúsculos cuerpos celestes que giran a su alrededor. Se trata de las lunas o satélites naturales.

Un satélite natural es un cuerpo celeste con suficiente masa y diámetro (como en la definición de planeta) que gira alrededor de un planeta pero cuyo baricentro o centro de gravedad se encuentra adentro de la superficie de este último. En nuestro caso, la Luna cumple con esta definición y su baricentro está en el planeta Tierra. Así como en los satélites de Júpiter (Io, Europa, Ganímedes o Calixto) cumplen con esta condición, ya que el baricentro está dentro de la superficie gaseosa, lo mismo sucede con Saturno y sus satélites, destacándose de estos últimos Titán.

Durante este recorrido imaginario, también tendríamos la posibilidad de toparnos con algún cometa. Se trata de cuerpos celestes pequeños y frágiles de forma irregular, compuestos por una mezcla de granos no volátiles y gases en estado sólido. Presentan órbitas elípticas muy pronunciadas que los llevan muy cerca del Sol y los devuelven al espacio profundo, frecuentemente más allá de la órbita de Plutón. Las estructuras de los cometas son diversas y muy dinámicas, pero todos ellos presentan como característica en común, una nube de material difuso o “cabellera”, denominada coma que los rodea y que, por lo general, crece en tamaño y brillo a medida que el cometa se aproxima al Sol. Si los observamos con instrumentos ópticos podemos visualizar un pequeño núcleo brillante de menos de 10 kilómetros de diámetro en el centro de la misma. La cabellera y el núcleo juntos constituyen la “cabeza del cometa”. Mientras se aproximan al Sol esas colas de material luminoso se extienden por millones de kilómetros desde la cabeza y en sentido contrario a la estrella. En cambio, cuando se encuentran lejos del Sol, el núcleo registra temperaturas muy bajas y el material que lo compone se muestra congelado. En este estado sólido, los cometas reciben a veces el nombre de “iceberg sucio” o “bola de nieve sucia”. Sorprendentemente, cada vez que un cometa visita al Sol pierde parte de sus componentes volátiles. En otras palabras, se convierte en otra masa rocosa de las tantas que habitan en el Sistema Solar. Por esta razón, se dice que los cometas tienen una vida corta, en una escala de tiempo cosmológica. Muchos científicos afirman que algunos asteroides son núcleos de cometas extinguidos.

El cometa Halley, oficialmente denominado 1P/Halley, es uno de los más conocidos y más brillantes. Se trata de un cometa grande que orbita alrededor del Sol cada 75-76 años en promedio, aunque su período orbital puede oscilar entre 74 y 79 años. Se lo observó por última vez en el año 1986 en las cercanías de la órbita de la Tierra. Se calcula que su siguiente acercamiento será en el año 2061. Aunque existen otros cometas más brillantes, el Halley es uno de los pocos que se pueden observar a simple vista en cada una de sus apariciones, por lo que del

mismo existen muchas referencias, siendo el mejor documentado a lo largo de la historia.

En 1986 varias sondas espaciales se encontraron con el cometa, entre ellas las Vega 1 y 2, la Giotto, la Suisei, y la ISEE-3/ICE, gracias a las cuales hoy tenemos gran información y fotos del cometa. Un año antes, se fundaba en la provincia Argentina de Tucumán, el Observatorio Astronómico de Ampimpa con el objeto de fotografiar el último paso del Halley por las cercanías de la Tierra. Las primeras fotografías del cometa se capturaron el 17 de noviembre de 1985 y el proyecto fue parte del Programa *Internacional Halley Watch* impulsado por la Agencia Espacial Norteamericana (NASA)

## La Vía Láctea

A diferencia de los hombres que pertenecieron a las primeras civilizaciones terrestres, hoy en día sabemos que el conjunto de estrellas que observamos durante las noches es parte de un gigantesco sistema. La forma de este sistema estelar se asemeja a dos platos hondos unidos por la parte superior. Nuestro sistema solar es un insignificante componente de este sistema estelar y se encuentra ubicado hacia sus bordes y a unos dos tercios del centro. Las estrellas aparecen concentradas con mayor densidad en la parte central y en las noches claras es posible observar una banda luminosa que atraviesa el cielo de un extremo visible al otro. Este paisaje nocturno es el que da nombre a nuestro sistema estelar o galaxia: Vía Láctea.

Imaginar lo que veríamos, de continuar esta travesía interestelar, supone manejar modelos mentales. Por ello, antes de continuar, consideramos conveniente introducir en el texto una nueva marca didáctica. Cómo ya se expresó en el Capítulo 1, la ciencia recurre a los modelos para estudiar y comprender como ocurren fenómenos que no podemos observar fácilmente o manipular directamente, como la gran explosión que originó al Universo, el comportamiento de los electrones en el átomo o la polinización de las flores. Diseñar y comprender modelos exige una dosis de creatividad. La creatividad es un proceso cognitivo que se desarrolla a lo largo de la vida y a partir de las relaciones interpersonales. Esto quiere decir que si la creatividad se puede aprender, también se la puede enseñar. Desde esta premisa, los docentes tenemos la responsabilidad de ampliar las capacidades creativas de nuestros alumnos mediante el juego mental: la fantasía, la imaginación y la producción de imágenes. Por ello, el empleo de modelos para

describir conceptos de cierta complejidad se vuelve imprescindible al momento de planificar nuestras clases. "A pesar de que los grandes avances del hombre en la comprensión de la realidad se han producido mediante saltos intuitivos de la imaginación y sólo después se han verificado de modo racional, nuestro sistema educativo sigue operando con el presupuesto de que ejercitar el intelecto es sólo desarrollar el potencial máximo del hombre" (Claxton, 1987).

Una galaxia es una masa formada por estrellas, gas y polvo que se mantiene unida por efecto de la gravedad. Las de menor tamaño pueden tener un diámetro de cientos de años luz y estar formadas por unas 100.000 estrellas, mientras que las mayores tienen un diámetro de unos tres millones de años luz y contienen más de mil millones de estrellas. Las galaxias se clasifican según un criterio establecido por el astrónomo Edwin Hubble (1889-1953). Según la misma, se conocen tres clases de galaxias: elípticas, espirales e irregulares; a nuestra galaxia le corresponde la clasificación de espiral.

Las espirales (Figura 2.1) presentan un denso núcleo central de forma esférica y unos brazos que se desarrollan a su alrededor en espiral. Muestran el aspecto de gigantescas ruedas de fuegos artificiales y adoptan diversos tamaños, aunque normalmente, llegan a contener una cantidad de materia equivalente a unos 2.000 millones de veces la masa del Sol. La mayor parte de esta materia corresponde a las estrellas que forman la galaxia y el resto se compone de gas, polvo cósmico y estrellas en formación conocidas como nubes moleculares. Las galaxias espirales se designan con la letra S. Dependiendo del menor o mayor desarrollo que posea cada brazo, se le asigna una letra a, b ó c (Sa, Sb, Sc). La imagen de la rueda también nos ayuda a imaginar el movimiento de rotación que experimentan las galaxias. Por ejemplo, en la galaxia de Andrómeda (el objeto visible a simple vista más alejado de la Tierra), el conjunto de estrellas que constituyen su núcleo realiza un giro en medio millón de años, mientras que su parte exterior lo hace en 20 millones de años.



Fig.2.1.  
Galaxia Espiral M 101  
Recuperado el 15/6/2012 de <http://hubblesite.org>

Por el contrario, las galaxias elípticas carecen tanto de brazos en espiral como de polvo y de gas, o por lo menos, los contienen en una baja proporción. En 1930, Hubble simbolizó las galaxias elípticas con la letra E y las subdividió en ocho clases, desde la E0, prácticamente esféricas, hasta la E7, con forma cilíndrica más ancha por el centro. En las galaxias elípticas la concentración de estrellas va disminuyendo desde el núcleo, que es pequeño y muy brillante, hacia sus bordes.

Las galaxias irregulares (Figura 2.2) se simbolizan con la letra I ó IR, aunque suelen ser enanas o poco comunes. Se engloban en este grupo aquellas galaxias que no tienen estructura y simetría bien definidas. Se clasifican en irregulares de tipo 1 o magallánico, que contienen gran cantidad de estrellas jóvenes y materia interestelar, y galaxias irregulares de tipo 2, menos frecuentes y cuyo contenido es difícil de identificar. Las galaxias irregulares se observan en las proximidades de galaxias más grandes, y suelen contener un gran número de estrellas jóvenes, gas y polvo cósmico.



Figura 2.2  
Galaxia Irregular M82 (El Cigarro)  
Recuperado el 27/6/12 de <http://astroaspe.es>

Es posible que en muchos de los centenares de miles de estrellas que forman una galaxia existan también planetas extrasolares o “exoplanetas”, es decir, planetas que orbitan una estrella diferente al Sol y que, por tanto, no pertenecen al Sistema Solar. Al 15 de junio de 2012 se han detectado 778 planetas en casi 600 sistemas planetarios que podrían responder a esta definición.

Hechas estas aclaraciones generales acerca de las galaxias, regresemos por un momento a nuestra “casa grande”, la Vía Láctea. A lo largo del diámetro menor de su abultamiento central, presenta un espesor de 20.000 años-luz y desde un borde al otro la distancia alcanza los 100.000 años-luz. Estos valores, no incluyen, sin embargo, la distancia a ciertas estrellas que se encuentran por encima y por debajo de la propia galaxia. Algunas de ellas están solas, pero la mayoría, se agrupan en cúmulos estelares. Estos cúmulos, que adoptan forma de esfera forman una especie de halo alrededor de la galaxia. El más cercano a la Vía Láctea se halla a unos 20.000 años-luz del sistema solar.

Nuestra galaxia, por lo tanto, está constituida por un conjunto de estrellas, la mayor parte de las cuales se encuentra en el plano central, junto a un anillo de estrellas individuales y de cúmulos globulares. Cuando se observa la galaxia con instrumentos ópticos, se observa que parte de los gases y el polvo que la forman,

presentan la apariencia de grandes nubes luminosas que se denominan “nebulosas”. La más famosa de las nebulosas es la gran nube gaseosa de la Constelación de Orión o del Cazador, la cual es visible a lo largo de toda la noche durante el invierno en el hemisferio norte y durante el verano en el hemisferio sur. En una noche despejada y alejados de las ciudades, si observamos el cielo nocturno, aún con un telescopio pequeño o con un simple binocular, descubriremos muchas más nebulosas que las que se aprecian a simple vista.

Otro aspecto a considerar, es que la totalidad de la Vía Láctea experimenta un movimiento de rotación. El Sol, como forma parte de ella, arrastra consigo también a la Tierra, a los planetas y al resto del Sistema Solar. Como otras estrellas cercanas, el Sol se mueve a través del espacio a razón de 240 km/s. Para imaginar este desplazamiento, de existir un medio de transporte capaz de alcanzar esa velocidad nos permitiría dar la vuelta a la Tierra en algo más de dos minutos y medio. Aún así, nuestra galaxia es tan grande, que el Sol tarda 225 millones de años en completar una revolución. Este inmenso período de tiempo se conoce como “año cósmico”. Si seguimos jugando con las mediciones, podríamos determinar que hace dos años cósmicos la vida en la Tierra estaba apenas comenzando y que hace menos de media centésima de año cósmico surgió la especie humana.

## El Grupo Local

La palabra galaxia proviene de un vocablo griego que significa “de leche” y se cree que se emplea desde los tiempos del Imperio Romano para referirse a la Vía Láctea. Con el tiempo, la expresión se comenzó a emplearse para denominar en sentido amplio a los incontables cúmulos de estrellas que habitan el Universo. Se encuentran a distancias tan grandes, que aún el diámetro de 100.000 años luz de nuestra propia galaxia empieza a palidecer por su insignificancia. Las galaxias más cercanas son visibles sólo desde el hemisferio sur. Se conocen con el nombre de Nubes de Magallanes, en homenaje al navegante español que las visualizó por primera vez durante su viaje alrededor del mundo, hace casi cinco siglos. Se parecen a trozos desgajados de la Vía Láctea, sin embargo, se trata de dos galaxias independientes, a más de 150.000 años-luz de la nuestra.

No obstante, las Nubes de Magallanes son vecinas muy cercanas, si comparamos sus distancias con las del resto del Universo ya que pertenecen al mismo cúmulo o agrupación de galaxias que nuestro sistema estelar: el Grupo Local. Este cúmulo posee alrededor de 16 galaxias y La Vía Láctea parece estar situada

en uno de sus extremos. La otra galaxia visible desde la Tierra sin telescopio, y perteneciente a este grupo, es la galaxia de Andrómeda, situada diez veces más lejos que las Nubes de Magallanes. Cuando se las analiza con grandes telescopios, podemos apreciar con nitidez algunas de sus estrellas individuales a pesar de los dos millones de años-luz que nos separan. La luz que esta noche veremos proveniente de ella comenzó su recorrido mucho antes de que el hombre existiera sobre nuestro planeta.

La totalidad del Grupo Local, que tiene una configuración semejante a la de un óvalo, ocupa un volumen tan grande, que no permite encontrar alguna comparación que nos ayude a imaginar sus dimensiones. Parece ser que se extiende unos 4,5 millones de años-luz en longitud, la mitad de esa cifra en anchura y unos 600.000 años-luz de espesor. La exploración del Universo más allá del Grupo Local y los futuros estudios que pueda conquistar la Astronomía, se encuentran hoy por hoy, en manos de la tecnología. En otras palabras, las galaxias pueden observarse tan lejos como los telescopios puedan profundizar en el espacio. Entre los telescopios ópticos más potentes, podemos citar al Gran Telescopio Canarias (GTC), con espejo primario segmentado de 10,4 metros de diámetro, dispuesto para observar, no sólo a las galaxias más lejanas, sino en particular a los exoplanetas. Por otra parte, durante los últimos cincuenta años, se ha introducido un método de observación que permite efectuar observaciones más distantes que las que proporcionadas por los telescopios tradicionales: los "radiotelescopios". Se trata de receptores de ondas de radio muy sensibles con antenas especiales. Su objetivo es el de recibir, no la luz, sino las ondas electromagnéticas en las frecuencias de radio emitidas por las estrellas y por el gas interestelar de nuestra propia galaxia y de las más distantes. Con los radiotelescopios, los astrónomos pueden sondear en el espacio con mayor profundidad que mediante los telescopios ópticos. En el desierto de Atacama (Chile), se está terminando de construir el Proyecto ALMA, el radiotelescopio más potente, con una sensibilidad diez veces mayor que la de aquellos que se encuentran en funcionamiento en la actualidad. ALMA constará inicialmente con 66 antenas de alta precisión que podrán facilitar el análisis de la luz proveniente de los gases moleculares, el polvo cósmico, los componentes de las estrellas, las galaxias y la posible existencia de vida.

Creemos que este momento es el propicio para dejar una nueva marca didáctica. Como hemos visto en el párrafo anterior, se explicó en apenas dos líneas cual es el principio de funcionamiento de los radiotelescopios. Cada vez que en la enseñanza de la astronomía en general y en la enseñanza de las ciencias naturales en particular, apelamos al empleo de metáforas, analogías, comparaciones

o modelos para facilitar la comprensión de un concepto o de una teoría debemos prestar una atención especial al problema de la denominada “transposición didáctica”. El pedagogo francés Ives Chevallard (1997) denomina de ese modo al proceso de adaptaciones sucesivas de los saberes por los cuales el conocimiento erudito se transforma en conocimiento a enseñar y este en conocimiento enseñado. El conocimiento que produce la ciencia sufre numerosas mediaciones por parte de las sociedades científicas, las obras de divulgación, los manuales y libros de texto y el diseño curricular que generan un producto simplificado que se ofrece a los alumnos en la escuela. La transposición didáctica, a veces es bueno y a veces es mala y supone ciertos peligros que debemos tratar de evitar durante las prácticas de enseñanza: la deformación, el ocultamiento y el envejecimiento.

Por ejemplo, la “deformación” del contenido, se ha dado en las aulas cada vez que se ha comparado al átomo con un sistema planetario. La buena intención por facilitar la imaginación del modelo atómico por parte del alumno termina construyendo un aprendizaje totalmente erróneo. El “ocultamiento” se produce cuando se enseña un concepto evitando las partes complejas del proceso y “sacando de la galera” el producto final. Sería el caso de graficar el sistema solar con orbitas circulares porque los alumnos aún no conocen el concepto de eclipse. Finalmente, el “envejecimiento” se produce cuando el tema a enseñar evolucionó más rápido en el campo erudito que en el proceso de transposición y cuando llega al aula ha perdido vigencia por obsoleto.

## Las estrellas

Nuestro paseo imaginario partió de la Tierra, se acercó al Sol, atravesó de un extremo al otro todo el Sistema Solar, recorrió la Vía Láctea, dio una vuelta por el Grupo Local y se asomó al Universo lejano. Se dice que para conocer mejor los sitios que se recorren cada tanto hay que detenerse en algunos puntos de mayor interés para conocer más acerca de ellos. En nuestro viaje, este nuevo punto de detención se hará en las estrellas.

Las estrellas, y en consecuencia también el Sol, nacen en una galaxia a partir de una nube de polvo y gas que se acumula formando una esfera. A medida que la materia que contiene este cuerpo se va concentrando se produce un aumento de su temperatura interior lo que en algún momento dará lugar a la producción de reacciones nucleares. La estrella naciente, se destacará por su brillo, generalmente azulado, y vivirá millones de años. Después de transcurrido un largo período de

tiempo o etapa de Secuencia Principal y cuando se haya consumido totalmente el hidrógeno gaseoso presente en su núcleo que oficia como “combustible”, las reacciones nucleares pierden intensidad y la estrella comienza a incrementar su tamaño y luminosidad enrojeciéndose. Este momento de la vida estelar se denomina etapa de Gigante Roja. Posteriormente, de acuerdo con el valor de la masa de la estrella se da paso a una etapa que se concreta con diferentes finales: una Enana Blanca, una Estrella de Neutrones, explotar como Supernova o como Agujero Negro. Retomaremos luego, con mayor detenimiento, todo lo concerniente a la vida y a la muerte de las estrellas pero previamente necesitamos conocer algunas cuestiones básicas vinculadas a cuatro propiedades estelares: el brillo, la temperatura, el tamaño y la masa.

Una forma de clasificar a las estrellas es a través de su brillo aparente u observado. El brillo de una estrella se mide en una unidad denominada magnitud. Una estrella de magnitud 1 es más brillante que una de magnitud 2 y así sucesivamente. El primero que confeccionó un catálogo de estrellas dando cuenta de la luminosidad fue el astrónomo griego Hiparco, que vivió alrededor del año 150 AC. Unos trescientos años después Tolomeo amplió el trabajo de Hiparco e hizo un catálogo en el que utilizó el término magnitud. Tolomeo consideró seis magnitudes estelares que pueden distinguirse a simple vista, siendo éste el sistema de magnitudes utilizado hoy en día con algunos ajustes. En este sistema de medición una estrella de magnitud 1 es exactamente 100 veces más brillante que una de magnitud 6, siguiendo esencialmente una escala logarítmica.

Otro criterio de clasificar a las estrellas es a través de su temperatura. Para ello, se utiliza una escala desarrollada en el Observatorio de Harvard por Edward Pickering y Annie Cannon en la que se asignan siete letras o tipos espectrales en el sentido de mayor a menor temperatura, a saber: W,O,B,A,F,G,K,M,L,T. No todas las estrellas de un cierto tipo espectral tienen las mismas características, pudiendo aparecer ciertas diferencias entre las mismas. Por ello, se definieron diez subclases espectrales para cada tipo espectral, numeradas de 0 a 9. También se suele realizar un refinamiento aún menor introduciendo subclases decimales.

Los invitamos a seguir esta explicación con la ayuda de la Figura 2.3:

## CLASIFICACIÓN ESPECTRAL DE LAS ESTRELLAS

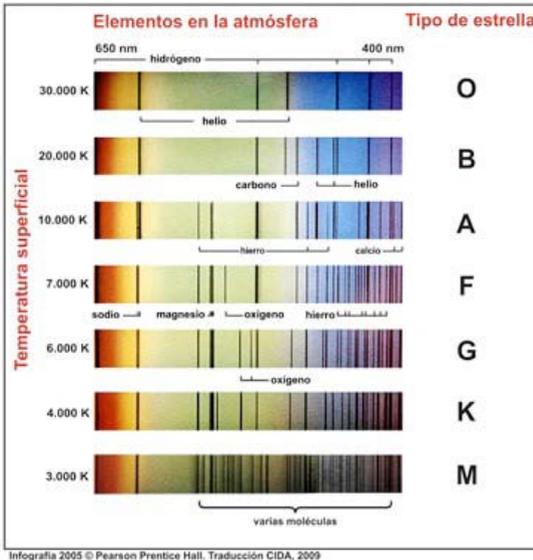


Figura 2.3.  
Secuencia de Harvard

En un extremo, se encuentran las estrellas de tipo O, que presentan estructuras ionizadas (con átomos que han cedido electrones) cuyas radiaciones máximas se ubican en la zona azul del espectro y en el otro extremo, las estrellas de tipo M, que irradian con mayor intensidad hacia la zona roja del espectro. ¿Qué significa esto? A medida que nos desplazamos de O hacia M, notamos que el color de las estrellas varía del azul al rojo. Si observamos con atención la llama de un mechero y variamos la entrada de aire con la perilla advertiremos que una llama de mayor temperatura produce luz azul mientras que otra de menor temperatura produce luz roja. Empleando un razonamiento análogo, los científicos que emplean la espectroscopía para indagar información en las estrellas concluyen que las estrellas O son las que poseen mayor temperatura y que las M tienen menor temperatura. Simultáneamente, determinaron que en las estrellas O se produce mayor ionización y en las cercanas a M una menor. Esta diferencia de comportamiento es la que determina las diferencias de color.

El brillo intrínseco y la temperatura de las estrellas no siempre guardan rela-

ción entre sí. Por ejemplo, el Sol es una estrella de clase G y de magnitud -27. Sin embargo Capella, perteneciente a la constelación de El Cochero, otra estrella de clase G, es 150 veces más brillante que el Sol. Entre las estrellas de tipo M, Betelgeuse, destacada por su brillo en la constelación de Orión, posee una magnitud de -3 y Antares, la más visible en la constelación de Escorpio, es de magnitud 4; pero la mayoría de las estrellas M con magnitudes mayores, son demasiado débiles para que las podamos observar a simple vista. Estas determinaciones, indican que no debemos suponer que todas las estrellas de la misma clase espectral tienen la misma luminosidad. La sencilla relación entre temperatura y luminosidad ocurre en casos aislados

No sólo, es posible clasificar a las estrellas por su brillo o su temperatura. Los astrónomos, también se han interesado por sus tamaños, propiedad íntimamente ligada a la masa, aunque para poder comprender mejor esta característica necesitamos adentrarnos en el ciclo de vida una estrella. ¿Cómo nacen y mueren las estrellas? ¿Cómo desarrollan semejante fuente de energía?

Hemos visto, que las estrellas se forman en las regiones más densas de las nebulosas o nubes moleculares como consecuencia de los cambios gravitacionales causados por la muerte de otras estrellas o por colisiones galácticas. Este proceso se acelera una vez que las nubes de hidrógeno molecular ( $H_2$ ) comienzan a caer sobre sí mismas debido a la cada vez más intensa atracción gravitatoria. En una fase posterior, ocurre un aumento progresivo de la densidad que afecta en mayor grado al centro de la estrella por nacer o "protoestrella". Tiempo después, se consolida un núcleo en contracción que registra elevadísimas temperaturas y que alcanza una actividad estable cuando comienzan las reacciones nucleares que elevan su presión y su temperatura. El fenómeno atómico que sostiene viva a una estrella y la convierte en una fuente liberadora de grandes cantidades de luz y calor, se conoce como fusión nuclear. ¿Cómo se arribó a esta conclusión?

A principios del siglo XX, los científicos, se preguntaban cuál era la fuente de la increíble energía presente en las estrellas. Ninguna de las explicaciones conocidas en la época resultaba suficiente dado que, ninguna reacción química alcanzaba el rendimiento necesario para mantener la luminosidad que manifestaba el Sol. El físico británico Arthur Eddington, fue el primero en sugerir, en la década de 1920, que el aporte de la energía estelar procedía de reacciones nucleares. Existen dos tipos de reacciones nucleares, las de fisión y las de fusión. Las reacciones de fisión, se producen cuando se destruye el núcleo de átomos pertenecientes a elementos radiactivos, tal es el caso de las reacciones que producen energía en las centrales eléctricas nucleares. Sin embargo, las reacciones de fisión, tampoco

eran útiles para explicar la energía producida en las estrellas. Los motivos fueron dos, por un lado, su relativamente bajo rendimiento energético y por otro lado, que para desencadenarse, la fisión requiere de elementos mucho más pesados que el hidrógeno. ¿En consecuencia, cómo seguir? Se necesitaba otra explicación... El primer mecanismo detallado de reacciones nucleares de fusión capaces de mantener la estructura interna de una estrella fue descubierto en 1938 por el Premio Nobel de Física Hans Bethe (1906-2005). ¿De qué se trata? La fusión nuclear es un proceso por el cual dos partículas atómicas se unen para formar un núcleo más pesado. Como se dijo, el período de vida más estable de una estrella, conocido como secuencia principal, transcurre aproximadamente durante el 90% de su vida y se da mientras se “mantiene viva” la fusión de los núcleos de sus átomos de hidrógeno. Las reacciones de fusión que tienen lugar adentro de los núcleos estelares son muy variadas y dependen de la masa y la composición en cada caso. Aunque normalmente, las estrellas inician su combustión nuclear con alrededor de un 75% de Hidrógeno y un 25% de Helio junto con pequeñas trazas de otros elementos. En el núcleo del Sol, y con la producción de temperaturas del orden de los  $10^7$  grados Kelvin, átomos de Hidrógeno de masas diferentes, se fusiona permanentemente para formar helio.

Se estima que nuestro Sol, posee suficiente combustible para otros 5.000 millones de años mientras que otras estrellas, pueden tenerlo sólo para 100 millones de años. Cuando una estrella se queda sin Hidrógeno empieza a enfriarse y a contraerse, y lo que comienza a sucederle a partir de este momento se pudo explicar a finales de los años veinte del siglo pasado. El científico indio Subrahmanyan Chandrasekhar de la Universidad de Cambridge calculó lo grande que podría llegar a ser una estrella que fuera capaz de soportar su propia gravedad una vez que hubiera consumido todo el hidrógeno que la compone. Asimismo, estableció un principio que se conoce como “límite de Chandrasekhar” que asegura que una estrella fría con una masa mayor de una vez y media a la del Sol no sería capaz de soportar su propia gravedad, hipótesis que fue confirmada en 1930, a partir de los trabajos de Lev Dadíovich Landau, Premio Nobel de Física 1962.

En consecuencia, si una estrella posee una masa mayor que el límite de Chandrasekhar podría dejar de contraerse y estabilizarse en un posible estado final, como una estrella enana blanca, con un radio de unos pocos miles de kilómetros y una densidad de decenas de toneladas por centímetro cúbico. Los objetos mejor conocidos de esta familia son las acompañantes de las estrellas Sirio y Proción. Tienen la masa del Sol pero el mismo tamaño de la Tierra, y aunque ya no tienen prácticamente reacciones nucleares, se mantienen a altísimas tempe-

raturas, pero se van enfriando hasta transformarse en enanas blancas en millones de años.

Landau, sugirió que existía otro posible final para la vida de una estrella también con una masa límite de una o dos veces la del Sol pero más pequeña que una enana blanca: las estrellas de neutrones. Transcurrió un tiempo considerable, antes que los científicos arribaran a esta explicación. En 1934, el astrofísico suizo Fritz Zwicky insinuó que las partículas subatómicas de una enana blanca podrían combinarse para originar partículas no modificadas llamadas neutrones. Recordemos que los neutrones son partículas que se agrupan en el núcleo de los átomos y poseen una masa pequeñísima para la imaginación humana pero de importancia en este "mundo invisible". Este científico, creía posible que los neutrones se unieran en pleno contacto, formando una esfera de unos 16 kilómetros de diámetro como máximo que, pese a ello, conservaría la masa de una estrella regular.

Cinco años después, el físico norteamericano Robert Oppenheimer, especificó con gran detalle, las posibles propiedades de las estrellas neutrónicas. Para él, estos objetos podrían alcanzar temperaturas de superficie lo bastante elevadas como para emitir gran cantidad de radiación en forma de rayos X. El estadounidense Herbert Friedman, pionero en el estudio de las radiaciones solares con sondas espaciales, investigó a la Nebulosa del Cangrejo, dónde, según se suponía, la explosión cósmica que la había originado podría haber dejado como residuo, ya no una enana blanca, sino una estrella de neutrones supercondensada. En julio de 1964, cuando la Luna pasó ante la Nebulosa del Cangrejo, se lanzó un cohete estratosférico para captar la emisión de rayos X. El experimento, se fundamentaba en las siguientes hipótesis. Si tal emisión procedía de una estrella de neutrones, se extinguiría tan pronto como la Luna pasara por delante de la estrella de neutrones lejana y diminuta, en cambio, si la emisión de rayos X, llegaba desde la Nebulosa del Cangrejo, mucho más grande, se reduciría progresivamente, en la medida que la Luna eclipsara a la nebulosa. Ocurrió esto último, y la Nebulosa de Cangrejo dio la impresión de ser simplemente una corona mayor y mucho más intensa, del diámetro de un año-luz.

Cuando todo parecía perdido, en el mismo año, se descubrió que las ondas de radio que devolvían ciertas fuentes del espacio lejano, revelaban una fluctuación de intensidad muy rápida. Fue como si brotaran, inesperadamente "centelleos radioeléctricos" que podrían compararse con las emisiones luminosas de un faro desde sus lámparas giratorias. Jocelyn Bell y Anthony Hewish, científicos de Cambridge, exploraron en 1967 este inusual comportamiento con un poderoso

radiotelescopio, hasta determinar que en un punto del espacio situado entre las estrellas Vega y Altair se confirmaba la presencia de estas ráfagas o pulsaciones tan regulares de ondas. En ese entonces, no se podía explicar la razón de ese comportamiento, por eso, Hewish las bautizó como “estrellas latientes” y de allí la expresión simplificada de “pulsar” o latido en inglés.

Hoy en día, creemos que las estrellas de neutrones o pulsares se mantienen gracias a un mecanismo constante de repulsión entre protones y neutrones en vez de entre electrones y protones como ocurre normalmente en cualquier partícula atómica. Los pulsares presentan un radio aproximado de quince kilómetros y una densidad de decenas de millones de toneladas por centímetro cúbico. Cifra casi insignificante, cuando la comparamos con la densidad de una enana blanca de por sí enormemente pesada.

El límite de Chandrasekhar, no sólo vino a explicar la muerte de una estrella como una enana blanca o como una estrella de neutrones, sino que admite una tercera posibilidad. Las estrellas con masas superiores a dicho límite presentarían, por el contrario, un gran problema cuando se les acaba el combustible: colapsarían y se convertirían en un punto. El ya citado, Robert Oppenheimer, antes de participar del proyecto que construyó la primera bomba atómica, desarrolló una respuesta para este fenómeno recurriendo a la teoría de la relatividad general. Para él, el campo gravitatorio de una estrella, cambia las trayectorias de los rayos de luz en el espacio-tiempo respecto de cómo debería ser si la estrella no hubiera estado presente. Por lo tanto, cuando la estrella se reduce hasta un límite crítico, el campo gravitatorio en la superficie llegaría a ser de tal intensidad, que los conos de luz se inclinarían tanto hacia adentro hasta impedir tanto la escapatoria de la luz como de cualquier otro objeto que se encontrara presente, dado que todo sería arrastrado por el campo gravitatorio. Esta descripción, ofrecida setenta años atrás, es la “fotografía” de lo que en la actualidad llamamos un agujero negro.

¿Qué es entonces un agujero negro? Se trata de una estrella con la densidad más elevada de todas las conocidas hasta el momento y capaz de modificar la trayectoria de los rayos de luz. Tan elevada, que toda su masa se encontraría comprimida en una entidad que algunos astrónomos denominaron “singularidad”. En los años 70, los británicos Ellis, Penrose y Hawking de la Universidad de Oxford, demostraron varios teoremas importantes sobre la ocurrencia y geometría de los agujeros negros. Se conjetura que en el centro de la mayoría de las galaxias existen agujeros negros supermasivos. De hecho, se cree que en el centro de nuestra Vía Láctea, se encuentra un agujero negro cuya masa sería de millones de veces la masa del Sol.

Si nuestra nave imaginaria, se adentrara hasta los límites conocidos del Universo, no dejaríamos de sorprendernos. Posiblemente, avistaríamos objetos extremadamente luminosos pero con formas diferentes a la de las estrellas, que nos obligarían a emplear lentes especiales para observarlos. Estas formaciones celestes tan distantes, se conocen como “fuentes cuasi-estelares” y existe consenso científico para pensar que además de emitir energía electromagnética en forma de ondas de radio y luz visible son núcleos activos de galaxias jóvenes en formación. Desde 1964, a partir de una expresión del astrofísico americano de origen chino, Hong Yee Chiu, se afianzó la denominación abreviada de “cuásar” (parecido a una estrella) cada vez que se hace referencia a estas nuevas fuentes astronómicas.

## El conocimiento del cosmos y el mañana

En el capítulo anterior hemos visto como la humanidad desde sus orígenes no cesa de hacerse preguntas acerca del cosmos. Las respuestas que encuentran, en las diferentes edades de la historia de nuestra especie, dependieron principalmente del desarrollo que en cada momento, había alcanzado la ciencia y la tecnología. Lo que llegó a ser verdadero para los hombres de una época fue descartado y reemplazado más adelante por nuevas “verdades” surgidas en tiempos posteriores.

La búsqueda incesante de nuevos conocimientos científicos nunca termina y las mismas preguntas continúan vigentes con el pasar de los siglos. Aunque los científicos cuentan en la actualidad con respuestas muy convincentes para preguntas tales como ¿por qué brillan las estrellas?, o ¿cuál es su ciclo de vida?, requieren de explicaciones más complejas cada vez que se topan con nuevos descubrimientos astronómicos. El griego Hiparco, a quien ya hemos mencionado, no se pudo preguntar por qué se expande el Universo, dado que en su época no se conocían las galaxias ni se disponía de medios para determinar sus movimientos.

Cuando nos preguntamos cómo se formaron las galaxias, cómo envejece una estrella o cómo se originó el Universo, nos enfrentamos con el problema de que distintos astrónomos sugieren respuestas bastante dispares, sin asegurar ninguno que su solución sea la correcta. Es de esperar que en los próximos años nuestros conocimientos sobre el cosmos se amplíen considerablemente ya que a los avances técnicos incorporados a los aparatos de observación, habrá que añadir los datos que se consigan a partir del empleo de sondas espaciales cada vez más sofisticadas y de misiones espaciales tripuladas.

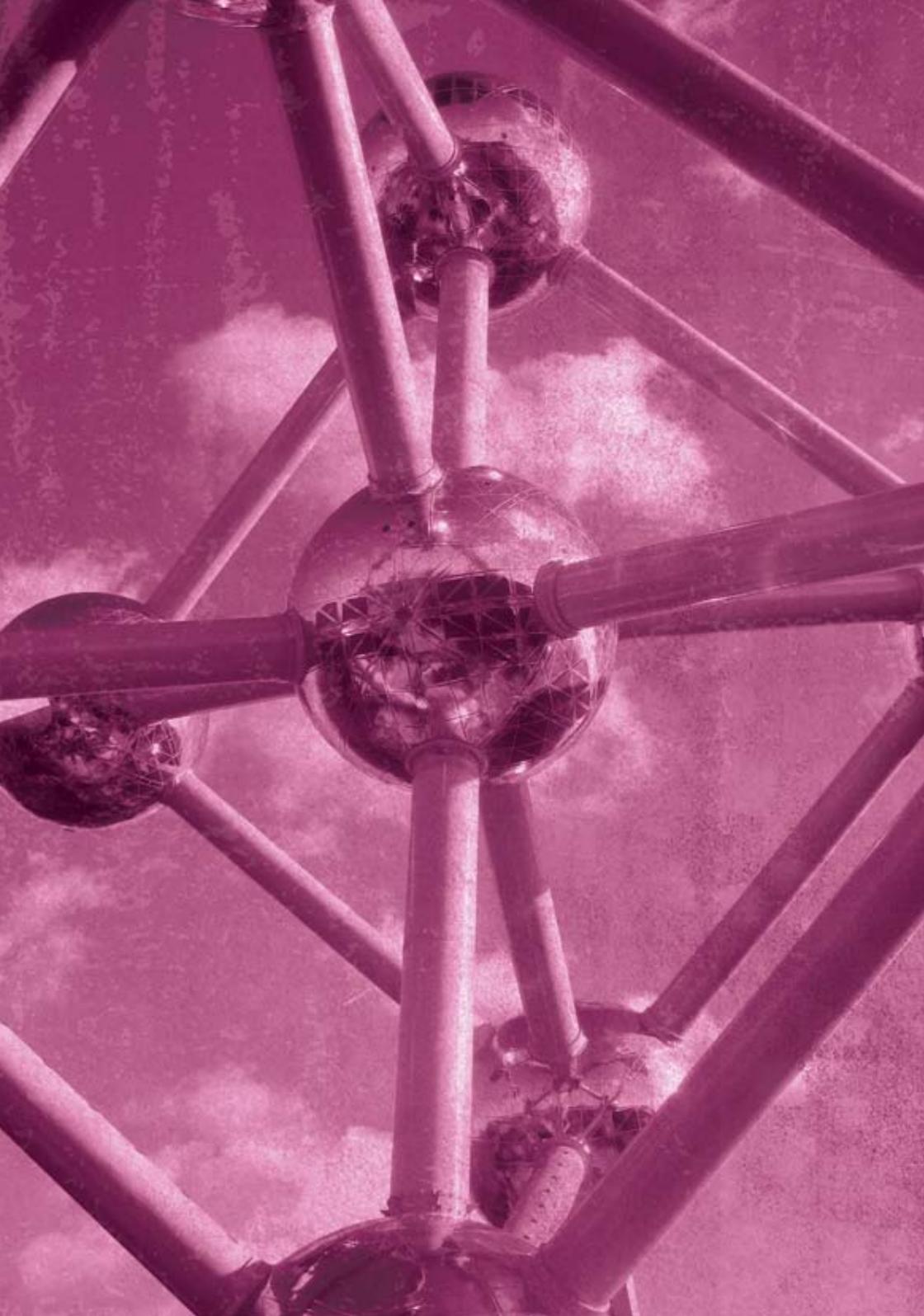
Se habrá advertido, que a lo largo de este capítulo, apelamos con frecuencia al empleo de verbos conjugados en el modo potencial. Expresiones tales como “podría ser” o “se supondría” son las que dejan abierto el camino a la formulación de nuevas preguntas y a la búsqueda constante de respuestas...

Una investigación de la psicóloga norteamericana Carol Feldman (citada por Valdez, 2000), indagó en los discursos de los maestros la presencia de indicadores de incertidumbre, duda y probabilidad como “podría”, “tal vez”, “quizá”. Por el contrario, se encontró con que los profesores utilizaban en su mayoría indicadores de certeza, es decir, afirmaciones concluyentes acerca de un concepto, una teoría un principio o una realidad dada. Actitud, totalmente ajena a la de un educador, que supuestamente, debería generar climas propicios para la duda, la incertidumbre y las buenas preguntas; una invitación a seguir pensando.

Por lo expresado anteriormente, y dado que este libro fue escrito por educadores para otros educadores, es que consideramos oportuno finalizar con este magnífico testimonio del pedagogo Jerome Bruner (1988) escrito cuando contaba con más de ochenta años de edad:

“Recuerdo a una profesora, la señorita Orcutt, que hizo esta afirmación en clase: “Resulta muy curioso no que el agua se congele a cero grados, sino que pase de un estado líquido a uno sólido”. Su explicación posterior expresaba un sentido de maravilla igual, incluso mejor, que el sentido de maravilla que yo sentía a esa edad por todas las cosas a las que dirigía mi atención, asuntos como el de la luz de las estrellas extinguidas que siguen viajando hacia nosotros aunque su fuente se haya apagado. Ella me invitaba a ampliar mi mundo de maravilla para abarcar el de ella. No estaba sólo dándome información. En cambio, ella estaba negociando el mundo de la maravilla y de la posibilidad. Las moléculas, los sólidos, los líquidos, el movimiento no eran hechos: habían de usarse para reflexionar e imaginar. La Srta. Orcutt era la excepción. Era un acontecimiento humano, no un mecanismo de transmisión. No se trata de que mis otras maestras no marcaran sus actitudes. Se trata, en cambio, de que sus actitudes eran inútilmente informativas.”





## CAPÍTULO III

# *Fundamentos teóricos y observacionales de una nueva teoría*

Eugenio Valiero

### **Grandes avances observacionales durante el siglo XX**

Como hemos presentado en el Capítulo I, diferentes especulaciones filosóficas, teóricas y religiosas, fueron sostenidas a lo largo de muchos siglos. Estas nos fueron otorgando las visiones cosmológicas que hoy conocemos, y que han mantenido ocupada la mente humana en descifrar los interrogantes que se formulaba al elevar su mirada al cielo, y al inspeccionar a su alrededor.

Retomemos un hito importante. Galileo Galilei, astrónomo, filósofo y matemático italiano fue el primero en dirigir el telescopio al firmamento para encontrar que la Luna no era perfecta sino que en su superficie era rocosa, es decir que presentaba irregularidades. Observó los satélites de Júpiter, y el planeta Venus con sus fases. Con todo ello se propuso insistir en que el Sol era el centro de nuestro sistema, desplazando a la Tierra de ese lugar. Pero no se conformó con aportar las primeras imágenes que ilustraran nuestro espacio exterior, también se aventuró a corregir antiguas ideas erróneas respecto de la caída libre de los cuerpos y determinó la simultaneidad del movimiento de dos objetos distintos, independientemente de sus masas.

En el siglo XVII Isaac Newton se valió de estos últimos descubrimientos para describir matemáticamente a la gravedad. Esta fuerza fue considerada “misteriosa” por siglos, puesto que ni los antiguos ni los contemporáneos a Newton pudieron dar razones de su manifestación. Pero sus intentos no alcanzaron para

explicar las difundidas perturbaciones en el movimiento de Mercurio pues se sabía desde tiempo atrás que la órbita de este planeta era irregular, como hemos visto anteriormente. Los cálculos predictivos de su trayectoria alrededor del Sol indicaban un pequeño error respecto de las observaciones.

Hagamos una pausa en este punto para formular algunas aclaraciones. El capítulo 1 trató los temas referentes a aspectos históricos, hasta llegar a la época de Newton. Nos interesaría poder avanzar un poco más con los acontecimientos posteriores. En 1905, Einstein publicó su Teoría Especial de la Relatividad. Postuló que el movimiento de la luz al desplazarse sería constante, y aproximadamente de 300.000 km/s. Sus concepciones afectaron al conocimiento de espacio y tiempo. Debemos reconocer que fue éste un momento histórico para la Física. La noción de espacio y de tiempo, cualidad abordada en el capítulo II, fue cambiada, trastocado, pero resultó mínima la transformación si se la compara con el resto de los efectos producidos en todos los órdenes de la realidad científica posterior.

De todas maneras, con esta nueva teoría no podía explicarse el comportamiento de Mercurio. Debió proponer en 1925 su Teoría General de la Relatividad, con lo cual reformuló la teoría gravitacional de Newton, y así pudo explicar las diferencias observacionales de la órbita de dicho planeta. También a principios del siglo XX se desarrolló la Teoría Cuántica de Planck referida a la transmisión de la energía, conceptos que se abordarán más adelante.

Continuemos con otro de los grandes aportes que ha recibido la Cosmología proveniente de la Física. Por estudios espectroscópicos, es decir, por el análisis de la radiación que emiten las distintas fuentes luminosas, Vesto Slipher y Edwin Hubble explicaron en forma independiente que la luz que llegaba de lejanas galaxias pertenecía a espectros de átomos que también se hallaban en la Tierra. Encontraron un corrimiento de sus longitudes de onda hacia energías más bajas. ¿De qué se trata todo esto? Veremos en lo que sigue del presente capítulo a qué nos referimos al hablar de dichos corrimientos, completando lo expuesto en el capítulo precedente. Dejamos al lector la labor de pensar la relación entre este hecho y los aportes de Bohr, Sommerfeld, Planck, Heisenberg, De Broglie, Schrödinger, Pauli, Dirac, y el mismo Einstein, entre otros. De todas maneras, serán incluidos en los desarrollos que siguen a continuación.

Como decíamos, no es sino hasta la primera mitad del siglo XX que comenzaron a surgir las primeras evidencias aportadas por la astrofísica, las cuales se manifestaron contrarias a lo que la comunidad científica pensaba por entonces. Comenzaba a percibirse una discordancia entre lo que se conocía del cosmos y las disquisiciones dadas por los astrónomos. La *Creación Continua* (esta teoría fue

denominada “*Steady State*” o “Estado Estable”), parecía ser una explicación satisfactoria para los físicos teóricos de inicios de siglo, idea que perduró en latencia hasta reinstalarse nuevamente cerca de los años ´60.

Pero con el surgimiento de la radioastronomía y la detección de la radiación cósmica de fondo (estos conceptos se explicarán en los apartados siguientes), comenzó una nueva era en la Cosmología como ciencia. Esta rama de la Física había integrado hasta entonces un gran cúmulo de observaciones aisladas y razones débiles para describir la constitución del universo y su evolución. Años más tarde, nuevos resultados observacionales dieron otros indicios, esta vez apuntando a la geometría del universo. Con estas confirmaciones se terminó de afianzar la validez del Modelo Estándar.

A lo largo del recorrido histórico que hemos realizado debemos señalar que ha sido de fundamental importancia durante los últimos tiempos el desarrollo tecnológico. Este permite nuevas conjeturas y puntos de vista en la manera de concebir el universo. Uno de ellos ha sido el surgimiento y perfeccionamiento de los instrumentos ópticos. Muchas son las preguntas que la humanidad se ha formulado al mirarse a sí misma, el lugar que ocupa y la realidad a su alrededor. No menos han sido los intentos de contar con un conjunto de explicaciones. La Cosmología de los últimos siglos ubica en los inicios de 1920, el punto de partida para el diseño de una nueva mirada del cosmos. Veremos más adelante por qué motivos lo señalamos.

Por lo pronto indicaremos que los aportes científicos de las pruebas de Hubble, inauguraron la vertiente que se completara luego con las ecuaciones de Einstein y con las interpretaciones de tales ecuaciones por los científicos George Lemaître y Alexander Friedmann, en las que se explica la expansión del universo y aspectos relacionados con su geometría.

Advertimos aquí al lector que, si bien aparecen en esta parte conceptos, tecnicismos, y nombres con los cuales no necesariamente tiene que sentirse familiarizado, en los apartados subsiguientes se desarrollarán con cierto detalle. Algunos conceptos son abordados en perspectiva histórica y diferenciaremos una primera etapa llamada del “Big Bang Tradicional”, con intervenciones creacionistas tales como las de Lemaître o la de “Expansión Perpetua” de Hoyle, hasta llegar a la etapa más moderna, que comienza con el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo en 1965.

Esta diferenciación de etapas de conocimiento responde a criterios subjetivos y es posible que se encuentren otras divisiones en periodos distintos con mayor exhaustividad. Este último hecho, el de la radiación cósmica, ha dado indicios de

la inhomogeneidad del cosmos. Sus consecuencias se correlacionarían más tarde, a partir de 1980, con la idea de Inflación del Universo, y con la Teoría Cuántica, y de la Relatividad General. Justamente las confirmaciones de la expansión no uniforme junto con las detecciones de la variación minúscula de la radiación cósmica proporcionaron el veredicto final. Estas últimas pruebas fueron obtenidas en el exterior de la atmósfera terrestre (para evitar las radiaciones propias de este planeta y la actividad de radiación en interacción con los gases atmosféricos), por el satélite COBE (Cosmic Background Explorer) durante 1992, el antecesor de la sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), de la NASA, cuyo objetivo se centró en mejorar el mapa de las microondas de radiación de fondo.

## Gravitación y Relatividad. Las ecuaciones del universo

Pensemos ahora, retomando lo expuesto anteriormente acerca del surgimiento de nuevas teorías durante el siglo XX que fortalecieron la Cosmología, algunos aspectos relacionados con la gravedad newtoniana. Debemos hacer mención a la incidencia de nuevas explicaciones propuestas por Einstein. En el mismo orden nos interesa incluir la discusión de algunas de las ecuaciones de la Teoría de la Relatividad para comprender su importancia en la Cosmología.

La experiencia cotidiana nos muestra que si un objeto es dejado en libertad, a una altura cualquiera con respecto a un determinado nivel, este tiende a caer a tierra como si respondiera a una solicitud de atracción, es decir, cae. Por ejemplo, si consideramos un cuerpo cualquiera, sea una moneda, en referencia a un nivel arbitrario, sea este el piso de la habitación en la que nos encontremos, comprobaremos que al soltarla, esta caerá recorriendo un espacio igual a la altura. Parece simple y es un hecho muy natural para nuestras vivencias más habituales. Pero visto con detenimiento, y puesto a consideración del asombro y la observación genuina, es sorprendente. Este mismo fenómeno ha capturado la sensibilidad y la perplejidad de muchos hombres de las ciencias y de la Filosofía de gran parte de la historia humana.

Por lo general, ante hechos similares no nos cuestionamos demasiado acerca de las causas y de los por qué de este fenómeno. Una pregunta despojada de la complejidad físico-matemática, a la que ya nos hemos acostumbrados, o a la misma naturalidad de los sucesos cotidianos, nos llevaría a formularnos inquietudes que desafían la razón. ¿De qué origen es esa manifestación? ¿Cuál es su identidad? ¿A qué se debe ese comportamiento de los cuerpos en la Tierra? ¿Ocurrirá

lo mismo en otros sectores del cosmos? Todos estos son interrogantes sujetos a formulaciones diversas en su elucidación a lo largo muchas culturas humanas.

Para Isaac Newton, en el siglo XVII, no resultaba claro el concepto que encierra la idea de gravitación. Newton no pudo develar cuáles eran las causas más íntimas que hacían a la interacción de la materia. Sin embargo, se abocó a desenmarañar y describir -en fórmulas matemáticas- el efecto de atracción de dos cuerpos en el espacio. Con su famosa ecuación  $F_g = -G m_1 m_2 / r^2$ , describió las fuerzas de atracción entre dos cuerpos cualesquiera separados por una distancia  $r$ .

En la expresión anterior  $F_g$  sería la llamada fuerza gravitatoria newtoniana. Esta fuerza no solamente incluye en su descripción a los objetos que nos rodean y los cuerpos de los que diariamente podemos contrastar sus efectos. Es extensible a todas las entidades con masas "m" del universo, dado que así lo pensó el mismo Newton. Es decir que también quedarían incluidos todos los sistemas masivos que se influenciarán a distancia. Con estas formulaciones se hace predecible la intensidad de la fuerza que se establecerá entre dos o más cuerpos con masas cualesquiera. Dependerá de la distancia que las separa y de la magnitud de tales masas.

Continuemos aclarando algunas componentes de esta fórmula. En la ecuación de Newton,  $G$  representa una constante, que fue calculada primeramente por Henry Cavendish en 1798 y cuyo valor es de  $0,0000000000667259 \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ . Como puede observarse también en la misma fórmula aparece un signo negativo que señala la atracción entre los cuerpos. Esta constante enviste gran importancia, y su determinación experimental ha sido muy exitosa. No obstante ello, muchos se han preguntado acerca de qué ocurriría en el caso de no haber sido siempre constante o en caso de estar sujeta a factores condicionantes no del todo "visibles" para la ciencia.

"Esta dificultad para medir  $G$  es desafortunada, ya que la gravitación tiene un papel esencial en las teorías del origen y estructura del universo. Por ejemplo, nos gustaría saber si  $G$  es realmente una constante. ¿Cambia con el tiempo? ¿Depende del estado químico o físico de las masas? ¿Depende de su temperatura? A pesar de muchas investigaciones experimentales, hasta ahora no han sido confirmadas tales variaciones de  $G$  sin ambigüedad; sin embargo, las mediciones continúan depurándose y mejorándose, y siguen adelante las pruebas experimentales". (Resnick, 2000:387)

¿Cómo deberíamos leer esta ecuación? Para enunciar su contenido diremos que: "la fuerza de atracción entre dos cuerpos resulta directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distan-

cia que las separa". Pero, ¿qué otros significados se desprenden? De la misma expresión podemos deducir que si una de las masas se duplicara, la fuerza se manifestaría con una intensidad doble; en cambio, una disminución a la mitad de una de las masas, nos arrojaría como saldo la mitad de la fuerza anteriormente observada. Si en lugar de multiplicar o dividir las masas por 2, las multiplicáramos por cualquier constante entera  $k$ , la fuerza se modificaría  $k$  veces.

Y, ¿qué pensar de la distancia  $r$ ? Se definió a dicha distancia como la separación entre los centros geométricos de tales partículas. De la misma ecuación se deduce que si la distancia  $r$  aumenta, la fuerza debe disminuir, y de disminuirse la distancia, la fuerza aumentaría. En ambos casos, lo haría con una razón cuadrática. Análogamente, una distancia doble será causa de disminución en la fuerza en 4 veces; una distancia de  $1/2$ , aumentará cuatro veces la fuerza, etc. Todas estas afirmaciones se pueden verificar con tan solo tomar algunos valores arbitrarios y reemplazarlos en la expresión gravitatoria de Newton.

Pensemos ahora en otras cuestiones más generales, asuntos independientes de lo numéricos y de los cálculos. De esta manera nos introduciremos en nuevos argumentos que proporcionan gran relevancia a la manera en que Newton vio al mundo. Una observación importante nos señala que la fuerza que mantiene unida a la Luna y la Tierra es la misma fuerza responsable de la caída de los cuerpos. Esta deducción es generalizable al resto de los cuerpos del universo, incluidos los planetas de nuestro sistema solar y las estrellas de la Vía Láctea. Es esta una ley universal por la cual la Mecánica Terrestre se equipara con la Mecánica Celeste.

Como hemos dicho anteriormente, la causa gravitatoria no fue develada por Newton, pero sus efectos, la atracción entre la Tierra y los objetos sobre su superficie pudo estudiarse con esta ley, muy simple por cierto si se la compara con las ecuaciones relativistas o las cuánticas. Tanto en la concepción como en la manipulación matemática esta expresión se estableció satisfactoriamente para la Física Clásica durante más de dos siglos. Aun hoy no presenta contradicciones con las mediciones del orden cotidiano, o con el cálculo de distancias, fuerzas y masas interplanetarias. No obstante ello, en 1915 nació una nueva teoría de la gravitación llamada Teoría General de la Relatividad cuyo autor, Albert Einstein, prometía transformar el espacio y el tiempo de Newton.

"El espacio newtoniano donde se desarrollaban todos los eventos de la física era rígido, inmutable e independiente de la materia que contenía en su interior. El tiempo newtoniano fluía de idéntica manera (el andar de los relojes era idéntico) para todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento relativo". (Gangui, 2009: 14).

No sólo el sistema solar estaría comprendido en la nueva descripción gravitacional, sino cualquier sistema masivo del universo, incluso la luz, como se verá más adelante. Pero, ¿cómo explica Einstein a la gravedad? ¿De qué habla? Intentaremos desarrollar sus representaciones cómo lo hicimos con Newton, pero sin entrar en dificultades matemáticas de comprensión. Las formulaciones matemáticas de la Teoría de la Relatividad presentan un grado de complejidad elevado, pero conceptualmente esta teoría es sencilla.

Una de sus implicaciones atañe a la desviación de los rayos de luz por acción de un campo gravitatorio. Fue esta una predicción efectuada por Einstein a partir de sus ecuaciones. Otros aspectos que pudo explicarse se refieren a las diferencias en el traslado de Mercurio alrededor del Sol, ya mencionado anteriormente. Por último mencionamos las deducciones temporales respecto de dos relojes marchando en sistemas de referencia distintos. La teoría señalaría que el tiempo para estos relojes transcurriría de manera distinta. Si el sistema de referencia para uno de ellos está en reposo, una medición de un evento ocurrido marcaría diferentes tiempos que en otro sistema de referencia en movimiento.

Debido al nivel de abstracción y a los conocimientos que requiere la manipulación de los elementos formales del desarrollo de la teoría, nos vemos impedidos en brindar mayores detalles en este texto cuyo objetivo dista del alcance que nos interesa (el de presentar un esquema mental de las atribuciones de la relatividad de Einstein).

Avancemos ahora un poco más. De acuerdo a la postura relativista, la presencia de materia inercial o gravitatoria en el espacio, modifica las propiedades del entorno. Esta sería la causa responsable del comportamiento de los cuerpos cercanos, de ser "atraídos". Digamos que, de acuerdo a la relatividad, al interponer un cuerpo de una cierta masa en una región del espacio este se ve interferido, transformado, "arrugado", ya no es igual que antes. Y agreguemos algo más, de acuerdo a la teoría de Einstein, el espacio no es independiente del tiempo: juntos constituyen las coordenadas de la realidad que no pueden separarse, el espacio-tiempo. Las tres dimensiones conocidas (alto, ancho y largo) nos darían una referencia incompleta de la ubicación de los objetos y de las cosas si no tuviéramos en cuenta una cuarta dimensión indisoluble de ellas: el tiempo. Esta es una nueva forma de concebir el espacio, el mismo está afectado por el tiempo.

Para poder obtener una representación de lo que decimos, podemos recurrir a una analogía. Imaginemos que extendemos un paño sosteniéndolo por los cuatro vértices de manera que forme una superficie plana tensa. Este paño podría ser un pañuelo, un mantel o un trozo de tela cualquiera. Pensemos ahora la expe-

riencia de colocar un objeto en el centro de manera que quede allí. ¿Qué observaríamos? El centro del paño se hundiría y transformaría la superficie plana en una superficie con una curvatura cuya forma se debe a la fuerza que el cuerpo ejerce sobre ella. La curvatura sería más pronunciada en las proximidades del objeto dependiendo también de algunas características de dicho cuerpo. Por ejemplo, a mayor masa mayor sería la deformación que introduciría en el paño. En los bordes conservaría la forma inicial o tendría una curvatura casi nula. ¿Y qué ocurriría si agregáramos un objeto más pequeño conservando el que ya teníamos, supongamos una bolita de vidrio, en las proximidades de dichos bordes?

Si ensayáramos tales prácticas observaríamos que la bolita se pone a rodar hasta caer en el centro, junto con el primer objeto. Si en lugar de soltar la bolita le imprimiéramos una velocidad inicial pequeña, su dirección de desplazamiento se vería modificada, torcería su rumbo describiendo una trayectoria curva. Salvando las diferencias entre la analogía y la propuesta teórica que intentamos explicar, y considerando que el paño hace las veces de “espacio”, veríamos cómo éste es condicionado por la materia que lo ocupa; además, al igual que la bolita, el movimiento de la luz en las proximidades de un cuerpo masivo se desviaría. Otra de las consecuencias de interponer campos gravitatorios intensos en el espacio es el efecto modificador sobre el tiempo en regiones cercanas.

Otros aspectos de la teoría de Einstein han sido contrastados empíricamente en diferentes oportunidades. Aún así, nos sorprende pensar que el universo es matemáticamente descriptible. Hagamos un alto para permitirnos hacer una pequeña acotación: nos preguntamos ¿cuántas disciplinas científicas existen? Quisiéramos con ello, poder establecer una relación epistemológica con la generación de conocimiento cosmológico. Seguramente responderíamos que son muchas disciplinas. Aún así, parece que el cosmos sólo acepta ser develado por números, cantidades constantes, ecuaciones, por la Matemática. Es esta una dimensión del conocimiento que merece detenimiento y reflexión por parte de quienes nos sentimos atraídos por el saber.

El siglo XX significó una época de grandes avances para la teoría cosmológica; en ese mismo orden la discusión matemática de algunas expresiones acentuaron el poder descriptivo de los físicos que se valieron de fórmulas para representar diferentes aspectos de la realidad material del universo. Quizás ese hubiera sido el descubrimiento más importante por el cual Albert Einstein, basándose en los trabajos de Max Planck de la energía cuantificada, propuso que las partículas de luz (fotones) poseían una energía proporcional a la frecuencia de la onda luminosa. Esto es equivalente a decir que se puede conocer la cantidad

de energía " $E$ " que contienen los fotones con solo multiplicar su frecuencia " $f$ " por algún factor constante " $h$ " ( $E = h f$ ). En esta fórmula, " $h$ " resulta tener un valor determinado y fijo para cualquier estado energético. Esta constante fue llamada constante de Planck. Dependiendo del sistema de unidades que se tome tiene un valor de  $6.62606896... \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Pensar a la luz cuantizada, constituida por esos cuantos o "paquetes" de energía, nos entrega una imagen "granulada" de la misma. Avanzaremos un poco más en el entendimiento de estos conceptos unas páginas más adelante. Es difícil poder imaginar un ente físico sin masa asociado a una determinada frecuencia, como también lo son los rayos X y las microondas. Es un ejercicio mental que requiere entrenamiento y un esfuerzo grande por comprender la cuantización de la radiación electromagnética. Este concepto no fue aceptado inmediatamente sino que debieron pasar algunos años para que se presentaran experiencias y descubrimientos tales como los del efecto fotoeléctrico, explicado por Einstein en 1905, en el cual una "partícula" de luz puede interactuar con otra partícula material como el electrón en la superficie de algunos materiales conductores y "arrancarlo". Otro fenómeno que dio cuenta de la cuantización electromagnética fue el efecto Compton, que consiste en el aumento de la longitud de onda de una emisión electromagnética al "chocar" con los electrones de valencia de una determinada clase atómica. Estas fueron las bases experimentales que corroboraron la validez de la fórmula de Einstein.

Convengamos en que existen otras expresiones que aportan a la descripción del universo como es la ecuación que justifica la llamada informalmente Primera Relatividad:  $E = m c^2$ . Mediante ella, Einstein describe la relación entre la masa " $m$ " y la energía " $E$ " de un determinado sistema y, por qué no, de todo el universo. Esta se asocia a un factor constante de conversión que resulta del cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío " $c$ ". Esta expresión es la portadora de la equivalencia entre la masa y la energía. Estas serían dos expresiones de un único ente físico para la Física Moderna. Esta última ecuación ha sido ampliamente evidenciada por la Física de Partículas, en la fisión nuclear, y se aplica en el estudio de los agujeros negros y de los rayos cósmicos.

Partamos pensando que la masa  $m$  de un sistema que se desplaza a velocidades próximas a la de la luz se verá modificada, puesto que es así cómo la Teoría de la Relatividad y sus ecuaciones lo expresan. Démosle a esa masa el nombre de "masa relativista". Indiquemos, además, que si el sistema tiene inicialmente una masa  $m_0$  cuando no se mueve, su masa relativista podría resultar de considerar la masa en reposo multiplicada por un factor de proporcionalidad ( $m = \gamma m_0$ ).

Ese factor de proporcionalidad se dedujo de las transformaciones de Lorentz y resultó  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ , donde “v” es la velocidad del sistema y “c” la velocidad de la luz en el vacío. Por tratarse de una raíz cuadrada de exponente negativo, la expresión restringe los valores de rapidez del sistema, puesto que al reemplazar por un valor particular de la velocidad de movimiento, ésta no debe hacer que el argumento  $(1 - v^2/c^2)$  sea menor o igual a 0; luego  $(1 - v^2/c^2) > 0$ . De ahí que, haciendo algunos pocos artificios matemáticos, tengamos que  $c^2 > v^2$  y por lo tanto  $c > v$ . Justamente ahora estamos en condiciones de afirmar que la velocidad de la luz es imposible de superar por cualquier sistema en movimiento, ya que de lo contrario la masa relativista de éste se haría infinita.

## ¿De dónde proviene la luz del universo?

De lo dicho en el apartado anterior nos debe quedar en claro que la luz es un ente físico que marca un parámetro de comportamiento particular respecto, por ejemplo, de la materia. A continuación expondremos algunos elementos de conocimiento de la rama de la Óptica que estudia la naturaleza y fenómenos de dispersión de la luz: la Espectroscopía. Podríamos extender esta definición al estudio de la radiación electromagnética y su interacción con la materia. En ese sentido no podremos no incluir conceptos de la Teoría Atómica y de la Teoría Cuántica de Planck. Anticipamos que en apartados siguientes se pueden encontrar algunos desarrollos explicativos con un grado de profundidad mayor.

¿De qué manera empezamos? Digamos que, el afán por descifrar la estructura de los átomos data desde los inicios del siglo XX. Esta actitud impulsó a los científicos a combinar los conocimientos de la naturaleza eléctrica de la materia con los desarrollos de postulados de la Teoría Cuántica de Planck. Esta teoría plantea que la energía se transmite en cantidades discretas llamadas, “cuantos”. Los cuantos de energía constituyen una especie de “minúsculos paquetes” permitidos en la transferencia energética. Esta sería una visión revolucionaria en tanto que introdujo la idea de discontinuidad, es decir, que si un sistema transfiere energía a otro no lo puede hacer más que en cantidades enteras de dichos paquetes y no en fracciones de ella.

Nunca antes había sido admitida o siquiera pensada esta posibilidad. El físico danés Niels Bohr en 1913 hizo uso de ella para proponer su modelo atómico de órbitas circulares con energías cuantizadas. Este modelo permitió interpretaciones de los espectros discontinuos de la luz emitida por algunos elementos (funda-

mentalmente el átomo de Hidrógeno), como “saltos” o transiciones electrónicas entre diferentes niveles.

Para comprender a qué nos referimos, comencemos aceptando que los distintos materiales sometidos al calor producen una luminosidad particular que es propia de cada clase atómica contenida en la sustancia sobre la cual se incrementa la temperatura. Si esa luz es recolectada y obligada a pasar por un prisma, se descompone en una especie de banda de colores con franjas más oscuras, denominada espectro. La rama de la Física que se encarga del estudio de los espectros luminosos de los elementos atómicos es la Espectroscopía.

La naturaleza de la luz ha sido la preocupación de filósofos y científicos desde tiempos remotos, pero fue Newton el primero en obtener el espectro de la luz blanca comprobando que se trata de una sucesión de colores (similarmente al arco iris). Es decir, es el primero en interpretar el fenómeno de la dispersión de la luz, que pone de manifiesto diferentes longitudes de onda constitutivas. Esta sucesión de colores comienza por el rojo y continúan hasta el violeta. Tenemos que hablar en tal caso de “luz visible”. Concebimos a la luz como una forma más de radiación electromagnética que asigna a cada color una longitud de onda y una frecuencia particular. Existen frecuencias de esta radiación que no son perceptibles para el ojo humano.

Diremos entonces que la luz es la parte visible del espectro electromagnético. Pensemos en un rango de percepción entre longitudes de onda de 400 nm para el violeta, y 700 nm para el rojo, es decir 0,00004 cm y 0,00007 cm, respectivamente. Las longitudes inferiores o superiores a tal rango no son visibles; las primeras se denominan ultravioleta y las segundas infrarrojo. El espectro completo de radiación electromagnética, en orden creciente de longitudes de onda, abarca desde los rayos gamma, pasando por los rayos X, la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, las microondas, hasta las ondas de radio. Vemos a continuación la Figura 3.1 que muestra las distintas longitudes de onda del espectro completo de radiación electromagnética.

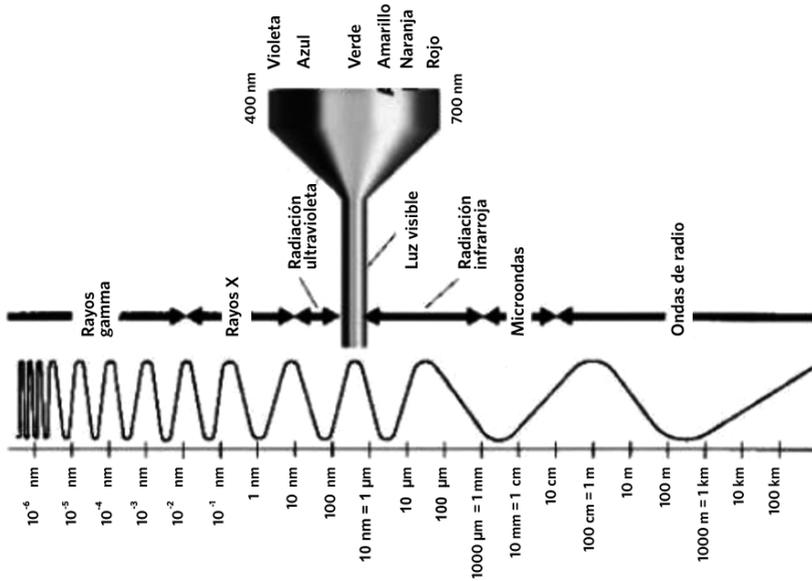


Figura 3.1

Espectro completo de radiación electromagnética en orden creciente de longitudes de onda.

Recuperado el 06/08/2012 de [http://intercentros.cult.gva.es/iesbu%F1ol/html/Departamenntos/FyQ/jupiter\\_radio/emspeccsmall.jpg](http://intercentros.cult.gva.es/iesbu%F1ol/html/Departamenntos/FyQ/jupiter_radio/emspeccsmall.jpg)

Continuando con el modelo atómico de Bohr, debemos imaginar, en un esfuerzo gráfico un tanto simplificado, que los electrones giran en órbitas circulares permitidas sin emitir ni absorber energía. Estas órbitas constituyen los denominados niveles estacionarios cuando el átomo se encuentra en estado no excitado o de mínima energía. Se dice entonces que su estado es normal. Si el electrón recibe un estímulo externo, ya sea eléctrico, electromagnético o térmico, éste puede saltar de un nivel a otro más externo, recibiendo el nombre de “átomo excitado”. Para pasar hacia un nivel más interno, el átomo debe emitir energía en forma de fotón. En esos casos, la devolución de la energía o su “captura” aparece en forma de luz cuantificada, puesto que la absorción y la emisión de energía están cuantizadas, según lo dicho anteriormente.

Pensemos ahora una de las implicaciones que resultaría de aceptar esta manera de concebir a la luz. Si quisiéramos responder la siguiente pregunta: ¿cómo

percibimos las imágenes?, deberíamos razonar así: si la luz está formada por pequeños paquetes, la radiación visible que nos llega de los objetos que vemos no es continua sino granular. Es decir que los objetos y las cosas son accesibles a nuestro cerebro en pequeñas porciones infinitesimales que se integran para componer una imagen “completa” de la realidad material. Las formas de los objetos no serían más que creaciones engañosas de nuestro sistema nervioso central. De este modo el mundo y la “realidad objetiva” (la que percibimos con nuestros sentidos), concreta, serían, sorprendentemente, discontinuos.

Retomemos nuestro tema de interés. Coincidentemente con los estudios espectroscópicos, los avances teóricos, tales como la teoría relativista, y los desarrollos cuánticos, iniciaron una etapa en la que los astrónomos se interesaron por analizar la luz que nos llega desde distintas partes del Universo. Observaron que los astros, nebulosas, cúmulos de estrellas y demás cuerpos celestes, emiten luz correspondiente a los mismos elementos que se encuentran en la Tierra. Debemos notar que el total de la luz emitida por las galaxias es la “suma” de la radiación electromagnética de los átomos que alberga. Esa radiación viaja a través del espacio y la percibimos como luz visible o en forma de ondas de radio, rayos X, microondas, etc.

Imaginemos la siguiente situación: como se ha explicitado en capítulos anteriores, la distancia promedio Tierra-Sol es de aproximadamente 150.000.000 de kilómetros y la velocidad de la luz en el vacío, como la de toda onda electromagnética, es cercana a los 300.000 km/s. Por tratarse de un valor constante y de vector de propagación rectilíneo, es posible calcular el tiempo que tardaría la luz emitida por un punto luminoso en llegar a la Tierra, partiendo desde el Sol, con tan solo recurrir a la Primera Ley del Movimiento Rectilíneo Uniforme, donde el tiempo es igual al cociente entre el espacio recorrido y la velocidad empleada en recorrerlo ( $t = e / v$ ). De tales cálculos resultaría que la luz demoraría aproximadamente 500 segundos en ser percibida desde que sale desde el Sol hasta que llega a la Tierra. Este intervalo de tiempo es equivalente a poco más de 8 minutos. ¿No es admirable? Si un día nos disponemos a contemplar el amanecer, al ver los primeros rayos de luz, ya habría amanecido algo más de 8 minutos antes. En general, la luz que percibimos nos habla de eventos que ya ocurrieron.

Hagamos otro ejercicio: pensemos que un mensajero del espacio nos envía una señal luminosa desde alguna de las estrellas más próxima a la Tierra, fuera del Sistema Solar, para exceptuar al Sol, por ejemplo *Alpha Centauris* (Tolimán) o *Próxima Centauris* (Hadar), de la constelación del Centauro. A ambas, a una distancia aproximada de 4,3 años-luz las podemos observar en las inmediaciones

de la constelación de la Cruz del Sur, en el hemisferio sur de la esfera celeste. Al recibir el mensaje, la luz viajó durante más de cuatro años hasta llegar a la Tierra. Tiempo que nosotros en “reposo” percibiríamos y mediríamos con nuestros relojes. Esto significa que nuestra respuesta sería recibida por nuestro amigo espacial imaginario casi 9 años después del intento de comunicación (viaje de ida y vuelta). Las noticias sobre lo que nos intentara contar nos llegarían un poco desactualizadas. De todas maneras, nos interesa más allá de si esto es posible o no, acordando que es un producto de nuestra imaginación, establecer la siguiente conclusión: es factible contemplar el pasado con solo capturar luz lejana.

Quisiéramos en este momento dejar planteado que la discusión acerca de la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz no es un tema terminado. En la actualidad se acepta la dualidad onda-partícula. Muchos fenómenos lumínicos pueden ser explicados recurriendo a la idea de “luz como partículas”, es decir como pequeños corpúsculos que se desplazan produciendo algunos efectos tales como la reflexión, si se interpreta que estas partículas “rebotan”; pero que muchos otros fenómenos, como por ejemplo la interferencia de la luz, no pueden ser explicados más que concibiéndola en su carácter de onda electromagnética.

## El universo visto “microscópicamente”. Los modelos atómicos y la constitución de la materia

Para comprender cómo funciona el universo tendremos que conocer y poder describir cómo está formado, cuál es su estructura, contenido, y dinámica actual, pasada y futura; descontando desde ya que aceptamos que el universo evoluciona y que va cambiando a lo largo del tiempo (esto se verá con más detenimiento en el capítulo IV). Más adelante, en secciones siguientes, se analizarán algunos conceptos y pruebas observacionales y los conocimientos que brinda la imagen que compone la Física y que se va desentrañando científicamente. Particularmente, es también muy importante apelar a la dimensión microscópica o, mejor dicho, cuántica de las partículas que lo componen. Nos proponemos en este apartado exponer sintéticamente las bases de la Teoría Atómica y de la Mecánica Cuántica, describir algunos de los fundamentos de las hipótesis de Planck, discutir brevemente sus ecuaciones y conocer sucintamente algunos aspectos relacionados con las partículas elementales.

Anteriormente señalamos que el físico alemán Max Planck fue quien introdujo la idea de que la energía se transmite en términos discretos o unidades llama-

das cuantos. Planck estudiaba la radiación emitida por algunos cuerpos al ser calentados y la de los cuerpos fríos, cuya intensidad resultaba menor (cercana a la radiación infrarroja). Para tales experiencias no le bastaban los conocimientos de la Termodinámica, puesto que los cálculos le proporcionaban cantidades infinitas en las intensidades de la radiación que pretendía describir. En la práctica encontraba que tales emisiones, tanto para longitudes grandes o pequeñas, lograban un aumento hasta alcanzar un máximo y luego disminuían en intensidad, siendo siempre valores inversamente proporcionales a las temperaturas absolutas (en la escala absoluta Kelvin), a las que se encontraban los cuerpos. De este hecho dedujo que la energía debía estar cuantizada y que esa energía es inversamente proporcional a la longitud de onda emitida " $\lambda$ ", o sea, directamente proporcional a la frecuencia  $f$  de la radiación puesto que  $f = c/\lambda$ .

Recordemos la expresión asociada a las energías de los fotones que anteriormente hemos mencionado  $E = hf$ . Ahora intentaremos generalizar lo dicho para fotones y radiaciones emitidas por cuerpos calientes. Posteriormente a que Einstein propusiera que no solamente dichos entes físicos emitían radiación cuantizada sino que, en general, la energía de radiación se da en forma cuántica, Louis de Broglie, un físico perteneciente a la nobleza francesa, extendió estos conceptos agregando que si un ente físico cualquiera posee energía, debe asociárselo a una onda, y viceversa, que los entes oscilantes se asocian a una cierta energía. Nosotros interpretamos que un fotón es una clase de "partícula" que se comporta como una onda oscilatoria de campos de fuerzas eléctricas y magnéticas. Es justamente ese concepto el que hace referencia a la dualidad onda-partícula, de la que habláramos al final del apartado anterior. De hecho, este mismo comportamiento se observa en el electrón del Modelo Atómico de Bohr y en descripciones atómicas posteriores. Con ello queda planteada la necesidad de revisar la manera de pensar el movimiento de partículas y cuerpos significativamente pequeños.

A medida que disminuimos la escala de observación de la materia debemos preguntarnos si es posible determinar con precisión algunas propiedades como la velocidad, o la posición de tales partículas. Este hallazgo se llama *Principio de Incertidumbre de Heisenberg*. La Mecánica Cuántica es la rama de la Física que se encarga de describir el desplazamiento de estas partículas diminutas y de las fuerzas que intervienen en dichos movimientos, y en la interacción con otras partículas.

No es fácil familiarizarse con algunos componentes básicos de partículas de las que solo nos llegan noticias sin poder reconocer. El átomo es un ente físico que no podremos ver ni aun con un ultramicroscopio. El Principio de Incertidumbre

contiene esa afirmación. Existen hechos experimentales y fenómenos muy bien explicados, si se concibe al átomo como una esfera pequeñísima formada por protones y neutrones en una especie de espacio central rodeado de electrones que se mueven en una zona, la cual podríamos llamar corteza, que avalan los supuestos anteriores. Los protones y neutrones poseen una masa muy próxima entre sí, y los electrones son alrededor de 1.850 veces más pequeños que aquéllos.

Veamos cuál es el contexto desde el que se arriba a tales suposiciones. Desde siempre el hombre se ha interesado por el estudio y conocimiento de la materia; de su estructura, de su composición, y de los procesos que en ella tienen lugar. Se atribuye a Demócrito, filósofo de la antigua Grecia del siglo V a.C., el haber aportado la idea de que la materia estaba formada por partículas diminutas a las que denominó átomos (indivisibles). Pero no es hasta los primeros años del siglo XIX que las concepciones del profesor y científico inglés John Dalton vislumbraron un camino de conocimiento distinto. Sus principales supuestos fueron:

- Los átomos son partículas pequeñísimas que forman toda la materia.
- Si se trata átomos de un mismo elemento, estos son idénticos en propiedades químicas, masa y tamaño.
- Los átomos de una misma clase son diferentes a los de cualquier otra clase.
- Átomos de diferentes clases forman compuestos.
- La relación entre el número de átomos de una clase respecto de otra, en un compuesto, es sencilla. Esto significa que mientras una clase atómica se presenta en una determinada cantidad en una molécula compuesta, otras clases atómicas en la misma molécula tendrán una relación simple entre números enteros y pequeños.
- Los átomos no se crean ni se destruyen en una reacción química, solo existe reordenamiento, separación o combinación de los mismos para formar nuevas sustancias.
- Volúmenes iguales de gases diferentes comparados en las mismas condiciones de presión y temperatura presentan igual número de átomos.

Aclaremos, en esta parte, que se habla de “átomos”, y no de moléculas puesto que la idea de moléculas no era admitida hasta el momento. La materia simplemente se suponía formada por átomos. Estas conjeturas pudieron ser perfectamente articuladas con las leyes gravimétricas, las que permiten establecer la relación entre masas de los elementos para formar compuestos y, al no entrar en contradicción con la teoría atómica de Dalton, dieron aval a sus supuestos.

Pero las sustancias gaseosas tenían un comportamiento anómalo cuando se las intentaba someter a los criterios atomistas. El desarrollo de la hipótesis molecular de Avogadro-Ampère, unos años más tarde, resolvió la controversia surgida entre las hipótesis atómicas para sustancias gaseosas que se suscitó entre Dalton y Gay Lussac. Este último, aseguraba, mediante sus resultados experimentales que, si los volúmenes de gases a combinar son iguales, el volumen del gas que se obtiene es la suma de los volúmenes iniciales, lo cual no podía explicar Dalton.

De esta manera debía pensarse que las moléculas gaseosas se formarían por la unión de dos átomos reagrupados biatómicos. Justamente esta fue la respuesta que elaboró el químico italiano Amadeo Avogadro (1776-1856), y por la misma época el físico francés André-Marie Ampère (1775-1836), cuyas hipótesis fueron análogas. Entre ellas se señala que volúmenes idénticos de gases cualesquiera, en las mismas condiciones de presión y temperatura, presentan idéntico número de moléculas.

Se agrega a lo anterior los resultados experimentales del físico y químico inglés Michel Faraday (1791-1867), a fines de la primera mitad del siglo XIX (que contemplaban cambios químicos por pasaje de una corriente eléctrica en una solución acuosa). Esto hizo sospechar de cierta complejidad de la materia aún no comprendida. Según ellos los átomos debían poseer características particulares en tanto masas y cargas eléctricas lo cual les inferiría comportamientos que identificasen a unos de otros. En 1864 el físico y matemático irlandés George Stoney (1826-1911) publicó su interpretación de los experimentos de Faraday, postulando la existencia de unidades discretas de carga eléctrica a las que llamó *electrones*.

Como podremos notar, el contexto científico estaba siendo muy estimulado por diversas experiencias físicas. En la misma época, las pruebas de conducción eléctrica a través de gases realizada en la década 1860-1869 permitieron establecer la existencia del electrón y determinar sus propiedades. Empleando un tubo de vidrio en el que se colocaron dos placas metálicas en los extremos, y conectadas a los polos de una fuente de alta tensión, hacia fines del siglo XIX, Stoney, Geissler (1814-1879) y Goldstein (1850-1930) pudieron estudiar los efectos de la descarga de una corriente eléctrica en gases a baja presión con la consiguiente producción de rayos a los que se llamó *catódicos*, y *anódicos*. Pensemos que con ellos se observó la existencia de cargas negativas y positivas que fueron deducidas del comportamiento de dichos rayos en presencia de un campo magnético, es decir, los electrones y protones.

Digamos aquí que las cargas tienen asignada un signo negativo o positivo como criterio de diferenciación de los posibles comportamientos mencionados

anteriormente. Con esto queremos indicar que las cargas negativas o positivas en términos objetivos no existen. Simplemente se trata de una distinción arbitraria, que en el ámbito científico se ha establecido convencionalmente, como parte de un acuerdo explícito que nos permite inmediatamente aludir a conductas diferentes entre las cargas.

Más tarde, en el periodo 1908-1917 el físico norteamericano Robert Millikan (1868-1953) logró determinar la relación entre la masa y la carga del electrón. En 1879, el químico inglés Crookes (1832-1919) había realizado una demostración experimental del desplazamiento lineal de los rayos catódicos y de su carga eléctrica; mientras que en 1897 el físico inglés Joseph Thompson (1856-1940) reveló efectivamente la presencia de cargas negativas en los rayos catódicos y su naturaleza corpuscular, proponiendo en 1904 el Primer Modelo Atómico consistente en una esfera con carga positiva en la que se distribuyen uniformemente y al azar los electrones, compensando la carga positiva (modelo "budín de pasas").

Otros científicos también hicieron su aporte al conocimiento de la constitución atómica. Röntgen (1845-1923), en sus prácticas con tubos catódicos en 1895, encontró una radiación penetrante capaz de producir fluorescencias en algunas sustancias sin ser desviados por la acción magnética de los imanes. Ante el desconcierto provocado por el fenómeno, al que no supo dar respuesta, denominó a los mismos rayos X. Pero casi simultáneamente, en 1896, el físico francés Antoine Becquerel (1852-1908), se dedicó al estudio de las fluorescencias y propiedades en algunas sustancias tales como sales de uranio que causaban oscurecimiento de placas fotográficas. Observó, además, que las radiaciones emitidas por dichas sustancias poseían gran energía y no se desviaban por acción de campos magnéticos. La diferencia con los rayos X de Roentgen radicaba en que eran emitidos de manera espontánea.

Los esposos Curie, colaboradores de Becquerel, se aventuraron a la búsqueda de una explicación, llamando radiactividad a tal fenómeno. Advirtieron la presencia de tres tipos de rayos: los rayos a (de carga positiva), los rayos b (de carga negativa) y los rayos g, que al no ser afectados en su trayectoria por las cargas de láminas metálicas interpuestas entre una fuente emisora y una placa fotográfica, no revelaban poseer carga alguna. Tiempo después descubrieron los elementos radiactivos radio y polonio. Hacia 1900, Max Planck presentaba su teoría cuántica, como ya hemos indicado anteriormente, según la cual la energía se transmitía o transformaba de manera discontinua, en unidades discretas o "paquetes" llamados cuantos de energía. Seguramente este fue un aporte en extremo significativo que facilitó el entendimiento de la constitución del átomo.

Sería interesante poder establecer algunas relaciones acerca de la importancia de los desarrollos experimentales que se venían produciendo. La fenomenología observada hasta entonces había puesto en duda la simplicidad del modelo de Thomson y sugería la necesidad de introducir modificaciones a la forma de concebir la naturaleza de la materia. El átomo no podía ser estático. En 1911 y bajo la dirección del físico neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937), Geiger (1882-1945) y Marsden (1889-1970), dos de sus alumnos y colaboradores, realizaron la experiencia de colocar un material radiactivo emisor de partículas  $\alpha$  en una cámara de plomo provista de una pequeña hendidura y enfrentarla a una placa delgada de oro rodeada por una pantalla recubierta por ZnS (sulfuro de cinc). Observaron que gran parte de los rayos atravesaban la lámina e impactaban sobre la pantalla (produciendo centelleo) y otra parte se desviaba llegando incluso algunos a reflejarse en la misma dirección.

Los hechos indicaban a Rutherford que el átomo debía estar formado por grandes espacios por los que las partículas  $\alpha$  lograban atravesar y que, aquellas que se desviaban, estarían aproximándose o colisionando, en su trayectoria, con partículas de igual carga que la repeliesen. De este modo infirió las ideas que se consolidaron en el denominado Modelo Atómico de Rutherford, el cual consideraba como idea fundamental la de un núcleo atómico cargado positivamente, rodeado por electrones. Las dimensiones del núcleo serían insignificantes comparadas con el átomo.

Otras de sus conclusiones estuvieron orientadas a descifrar la masa de las cargas positivas. Llegó a determinar que se trataba de la mitad de la masa atómica. Este modelo, semejante al sistema planetario en miniatura (con todas las diferencias que podamos encontrar), conserva la idea de neutralidad eléctrica, pero rompe con el supuesto de un átomo estático, lo imagina orbitado por electrones. Sin embargo pronto chocó con las concepciones de muchos de los científicos de la época, respecto de la Teoría Electromagnética, que objetaron la posibilidad de que los electrones se mantuvieran girando alrededor del núcleo por demasiado tiempo. Se decía que si toda partícula en movimiento emite energía en forma de onda electromagnética, los electrones pronto acabarían por detener su recorrido, al describir no una órbita circular sino en espiral, puesto que “consumirían” su energía orbital y se acercarían poco a poco al centro, para terminar siendo atraídos por el núcleo.

Otra dificultad se planteó al encontrar que la relación entre las masas de un átomo de Hidrógeno, que contiene un protón, y un átomo de Helio, que contiene dos protones, es  $\frac{1}{4}$  en lugar de  $\frac{1}{2}$ . Rutherford sugirió al respecto la existencia de

otras partículas presentes en el núcleo atómico (1920). Más tarde, en 1932 el físico inglés James Chadwick (1891-1974), reveló una partícula de igual masa, pero sin carga, a la que denominó “neutrón”.

Como indicáramos anteriormente, Niels Bohr propuso en 1913 su modelo atómico teniendo en cuenta la cuantización de la energía de Planck y las ideas que sugerían los espectros discontinuos de algunos elementos. Las orbitas circulares que imaginó para los electrones serían una especie de “surcos” en el espacio en los cuales se permite el movimiento sin emisión de energía, sin fugas energéticas. También ya hemos dicho que en 1905 Einstein, y en 1925 el físico francés Louis De Broglie (1892-1987), se refirieron a la dualidad de la radiación (onda - partícula). Por otra parte, en 1927 el físico alemán Werner Heisenberg (1901-1976) demostró la imposibilidad de determinar en un instante la posición y la velocidad exacta del electrón, surgiendo así enunciando el Principio de Incertidumbre o de indeterminación, del cual ya hemos hecho mención.

En la actualidad ya no podemos imaginar al átomo. Este se ha convertido en un modelo probabilístico complejo. El núcleo ha de pensarse matemáticamente rodeado por una región de probabilidad de carga negativa, esta región se denomina orbital y es la zona de mayor posibilidad de encontrar al electrón (95%). Para los átomos con mayor número de electrones, su ubicación y movimiento quedan determinados por medio de cuatro valores llamados *números cuánticos*: *principal* “*n*” (indica el nivel de energía), *acimutal* “*l*” (se refiere a la forma del orbital), *magnético* “*m*” (determina la orientación frente a un campo magnético), *de spin* “*m<sub>s</sub>*” (de origen netamente cuántico, alude al movimiento de rotación intrínseco del electrón). Es esta una versión un tanto más compleja que nos obliga a mantener siempre a mano la concepción de Bohr, puesto que es el átomo más “concreto” con el que podemos dirigir nuestro sentido práctico cada vez que necesitamos apuntar a hechos o procesos cotidianos.

## Partículas atómicas elementales y Mecánica Cuántica

Retomemos algunos de los conceptos del apartado precedente y aventurémonos ahora en una nueva dimensión del átomo. Pensemos por un instante que nos introducimos en el núcleo atómico. Encontraremos allí, de acuerdo a la descripción de los modelos atómicos que precede estas líneas, dos partículas fundamentales: protones y neutrones. Los primeros presentan carga eléctrica positiva, mientras que los segundos no presentan carga. Ambos son casi idénticos en ma-

sas aunque el neutrón es ínfimamente mayor.

La masa total de un átomo es prácticamente la masa del núcleo, y ésta está mayoritariamente constituida por neutrones puesto que los mismos generalmente superan en número a los protones (salvo excepciones como es el caso del Hidrógeno). De todas maneras hay cuestiones que merecen ser explicadas. De acuerdo a los conocimientos de la Electroestática, las cargas de igual signo se repelen y las cargas de distinto signo se atraen. Es por ello que nos preguntamos por qué causas se mantienen unidos los protones, ya que lo esperado sería que se alejaran como producto de las fuerzas de repulsión. La respuesta a esta pregunta indica que existen fuerzas de ligaduras más intensas que los mantienen unidos. Estas fuerzas reciben el nombre de *interacción fuerte*. Fue necesario comprender la estructura interna del núcleo, comenzando por revelar la existencia de los neutrones.

Otro asunto a resolver fue precisamente lo que planteaba dificultades al antiguo modelo, en el que las fuerzas que intervenían en mantener unidas a los constituyentes nucleares eran fuerzas extrañas para la Física (incluso hubo quienes creyeron en la existencia de electrones en el núcleo).

Antes de avanzar, acordemos lo siguiente: la interacción entre partículas no necesariamente debe relacionarse con choques entre ellas, sino que puede producirse también a distancia, con algunos saldos que son intercambios de otras partículas. Mientras pensemos en estas interacciones, es preciso que mantengamos presente algunas diferencias. Primero, es necesario decir que estas interacciones, además de la ya nombrada *interacción fuerte*, coexisten con otras fuerzas, como son la *interacción débil* y la *interacción electromagnética*. La *interacción débil* es responsable de la inestabilidad de los núcleos atómicos y generalmente se asocia a la formación de un electrón y un neutrino, como se verá en las líneas siguientes, mientras que la fuerte tiene un alcance que no supera el radio del núcleo atómico. Entre otras cualidades, las diferencias entre unas y otras interacciones se encuentran en el tipo de partículas que intercambian en la influencia mutua. Esto se podrá entender a continuación.

La interacción electromagnética se da en un espacio de acción llamado *campo electromagnético*, y presenta una "partícula" mensajera llamada fotón. La *interacción fuerte* se relaciona con *campo nuclear* cuya partícula mensajera es un ente llamado *pion*. Esta partícula puede surgir también del choque de protones y neutrones entre sí. A diferencia del fotón, cuya masa en reposo es nula, los piones tiene masa en reposo o en movimiento, y ésta aumenta a medida que aumenta su velocidad. La noción de reposo para el fotón es ideal, puesto que al no presentar masa su estado de reposo es imposible. Otra diferencia muestra que mientras

que los fotones se desplazan a la velocidad de la luz, los piones nunca pueden alcanzar tal rapidez. Indiquemos aquí que a este nivel subatómico, la mecánica estadística prevé una mirada también relativista en la que la energía y la materia no se diferencian del todo.

Una curiosidad interesante es que un pion es mucho más ligero que un protón o un neutrón, pero aun más pesado que un electrón (más de 100 veces). Y si deseamos acentuar la sorpresa agregaremos que los piones pueden portar cualquiera de las clases de cargas eléctricas, negativa o positiva, e incluso no poseer carga. Establezcamos la siguiente síntesis: los átomos, al interactuar con otros átomos ya sea por colisiones o por estímulos externos, emitirán fotones. A una escala 10.000 veces menor, los constituyentes del núcleo atómico en interacción emitirán piones.

El hallazgo, en la década del '30, de una nueva partícula proveniente de los estudios de rayos cósmicos mediante aparatos denominados cámaras de niebla, condujo erróneamente a identificarlas con los piones. Más tarde, al encontrar que estas partículas no se relacionaban con la interacción fuerte, se dedujo que se trataba de una nueva partícula a la que denominaron *muón*.

Estas observaciones fueron contrastadas con los intentos de los físicos por relacionar los hechos con el Modelo Estándar. Durante la Segunda Guerra Mundial la información acumulada fue lo suficientemente vasta como para poder aventurar una explicación. Hidekei Yakawa (1907-1981), físico japonés de apellido real Ogawa (puesto que adoptó el apellido de su esposa Sumiko Yakawa al casarse), fue quien inició el estudio de los campos nucleares, resolvió el dilema en 1949. Yakawa, al advertir que los átomos exteriores a la capa atmosférica interactuaban con los átomos de ésta y, por darse en un ámbito de enormes energías, advirtió que la interacción involucraba a las partículas del núcleo en las que se liberaban piones, llegando luego a establecer el comportamiento de esos piones. En el caso de aquellos que no presentaban carga, los neutros se descomponían en fotones, pero los que si acarreaban cierta carga, se desintegraban para dar un muón y una "partícula" que por entonces resultaba desconocida: el *neutrino*.

Debemos destacar una cualidad importante que diferencia a estas dos partículas, los neutrinos son muy poco penetrantes en la atmósfera debido a que interactúan demasiado con todas las partículas que encuentren en su camino; los muones, en cambio, no se relacionan demasiado con otros entes minúsculos y logran alcanzar la superficie de la Tierra e incluso atravesarla a grandes profundidades. A partir de entonces, el conocimiento de la "población de partículas cuánticas" se ha ido diversificando.

Por otra parte el estudio de lo que ocurría a ese nivel en la atmósfera se llegó a diferenciar una partícula con propiedades muy características: los *kaones*, los cuales forman parte de la actividad atmosférica, son más pesados que los piones, no tienen carga y se mueven rotando sobre sus propios ejes en distintos sentidos, es decir que presentan espín. En la actualidad se acepta que estas partículas están a la vez constituidas por otras más pequeñas denominadas *quarks*, cuyas dimensiones son aun inferiores que la longitud de onda de la luz blanca y todo el rango de radiación que ella representa. Esta luz es la única posible de ser percibida por el ojo humano; para otras longitudes de onda no es admitida la percepción. Es por ello que no podríamos esperar ver el átomo, ni mucho menos su interior. También se conoce un número variado de quarks, y cada una de las clases es particularmente constitutiva de diferentes partículas básicas, por ejemplo, un neutrón se forma a partir de dos quarks que son diferentes de los quarks que forman los protones.

Quisiéramos hacer una pausa en la clasificación de esta diversidad de partículas, que es cada vez más numerosa a medida que la investigación científica avanza, para detenernos en una propiedad muy especial de todas ellas: por cada partícula existe su antipartícula. Paul Dirac (1902-1984) fue un físico teórico británico, que desarrolló gran parte de la Mecánica Cuántica y de la Electrodinámica Cuántica. Este científico procuró un entendimiento exhaustivo del electrón y de las demás partículas a las que se asociaba un número de espín. De sus deducciones matemáticas pudo predecir la existencia de una "pareja" del electrón, a la que denominó *positrón*. En 1932 fue identificada esa partícula, con lo cual se consolidó la teoría de Dirac. A partir de entonces no ha cesado la actividad de búsqueda de las antipartículas del resto de los componentes nucleares y de las demás partículas asociadas a sus interacciones.

Una característica de los pares partícula-antipartícula es que al encontrarse, se aniquilan en grandes destellos luminosos. Sabemos que las fuerzas entre los componentes del núcleo atómico se establecen con intercambios de partículas y, según hemos dicho, estas partículas se asocian a números que describen sus movimientos de giros, llamados espines. Estos espines generalmente son números enteros (0, 1, 2,...) o semienteros ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,...), pero se caracterizan por no responder al Principio de Exclusión, como lo hacen las partículas materiales, por ejemplo el electrón. Esto da lugar a que existan un número no limitado de partículas de fuerza, y con ello fuerzas muy intensas. Este hecho también determina que al ser fuertes estas interacciones, las partículas no puedan manifestarse con alcances superiores al núcleo del átomo.

Para concluir nuestro esbozo acerca del átomo y la Mecánica Cuántica, agregaremos un apunte más. Según el tipo de interacción en las que se involucren las diferentes partículas se denominarán *hadrones* (en interacciones fuertes) o *leptones* (en interacciones débiles). Los hadrones, a la vez, se agrupan en *mesones* y *bariones*, lo cual responde a diferencias de masas, conjuntamente con particularidades en los respectivos espines asociados. Recordemos que además existe una clasificación que los ordena exclusivamente de acuerdo al tipo de espín; si éste es entero, la partícula será un *bosón*, en cambio si no lo tiene, se denomina *fermión*. Al igual que los elementos químicos se pudieron ordenar en una tabla por sus propiedades periódicas, algo similar ocurrió con el conjunto de partículas que han sido investigadas. Este trabajo se debe al físico estadounidense Murray Gell-Mann (1929- ), quien localizó grupos con características parecidas. También hizo sus aportes en tal ordenamiento el físico israelí Yuval Ne'eman (1925-2006).

Partículas Mensajeras	Características
Piones	Mantiene unidos a los protones en el núcleo en interacción fuerte, en la región denominada campo nuclear cuya distancia de acción no supera el radio nuclear. Puede formarse de la unión entre un protón y un neutrón. Su masa es no nula ni en reposo ni en movimiento. Pueden estar asociados a ciertas cargas que en algunos casos es positiva, negativa, e incluso no poseer carga alguna. La interacción entre ellos da como saldo fotones cuando son neutros y en caso de poseer carga emiten muones y neutrinos.
Bosones	Responsable de la inestabilidad de los núcleos atómicos. Se asocia a la formación de un electrón y un neutrino cuya acción excede el radio atómico.
Fotones	Es la partícula mensajera de interacción en un campo electromagnético. Presenta una masa nula en reposo.
Muones	Hallada mientras se estudiaban los rayos cósmicos durante 1930. Se la confundió con los piones pero luego se advirtió que no participaban de la interacción fuerte.
Kaones	Constituidos por partículas más pequeñas denominadas quarks.
Positrones	Antipartícula del electrón.

Tabla 3.1. Síntesis de partículas cuánticas.

## Efecto Doppler-Fizeau. El universo en expansión

Hemos indicado anteriormente que la luz, y más generalmente las radiaciones electromagnéticas, se descomponen en una gama cromática llamada espectro, en la que se observan líneas brillantes y otras oscuras. Hemos dicho también que la luz que nos llega proveniente de diferentes astros del Universo, o de cúmulos de estrellas como son las galaxias, resulta de la actividad cuántica del conjunto de átomos en su interior.

Agregaremos ahora una nueva consideración. Imaginemos primeramente, o hagamos la prueba experimental cuando pase frente a nosotros un automóvil con cierta velocidad, una ambulancia por ejemplo, de notar de qué manera percibimos el sonido de su motor en marcha, o el de su sirena. Comprobaremos que mientras se acerca el vehículo, el sonido es más agudo, es decir que presenta una frecuencia más alta, y al alejarse, lo percibimos más grave, es decir que tiene una frecuencia más baja. Esto significa que las ondas sonoras modifican la frecuencia de propagación cuando la fuente emisora está en movimiento, o por el contrario, si nos movemos respecto de la fuente percibiremos alteraciones en la frecuencia del sonido que emite.

Este fenómeno fue descrito a mediados del siglo XIX por el físico holandés Christoph Hendrik Ballot (1817-1890). Unos años antes, el físico austríaco Christian Doppler (1803-1853) había propuesto un aparente cambio de frecuencia de la luz emitida por fuentes móviles. Al finalizar la primera mitad del mismo siglo, Hippolyte Fizeau (1819-1896), un conocido físico francés, extendió el concepto al total de las ondas electromagnéticas conocidas. Es por ello que el efecto se conoce con el nombre de Efecto Doppler-Fizeau.

Podemos contrastar experimentalmente que el espectro de luz proveniente de un cuerpo luminoso en movimiento presenta las líneas espectrales corridas, las bandas oscuras se “aplastan” aproximándose entre sí del lado de uno de los extremos. En el caso de una fuente de luz que se acerque al observador, estas líneas se aproximan al color azul del espectro, en cambio, si la fuente se aleja se observará un corrimiento de bandas oscuras que se aproximan al color rojo. Este desfasaje se denomina *corrimiento al rojo o al azul*. Es importante establecer en esta parte que las diferencias entre las ondas sonoras y las ondas electromagnéticas son muchas, las primeras son ondas mecánicas que se propagan únicamente en caso de tener un medio material de soporte. Entre otras cualidades las ondas electromagnéticas, por ejemplo la luz, no necesita de un medio para trasladarse pudiendo hacerlo en el vacío (con su máxima rapidez).

Hasta aquí hemos recorrido un trayecto conceptual que nos permite reconocer aspectos básicos referidos a la naturaleza de la luz y a algunas manifestaciones especiales tales como es el efecto denominado corrimiento. Vesto Slipher (1875-1969) fue un astrónomo norteamericano que se dedicó a recopilar información de observaciones realizadas en el observatorio Lowell (Arizona, Estados Unidos) entre los años 1920 y 1950, con lo que pudo documentar el corrimiento de las líneas espectrales de la luz que provenía de diferentes galaxias hacia el rojo. Algunas galaxias mostraban corrimientos mayores, y eran justamente las más alejadas de nuestra propia galaxia.

A finales de la década del '30, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble (1889-1953) se abocó a interpretar dichos corrimientos y concluyó que las galaxias se alejan del observador terrestre a velocidades cada vez mayores en tanto estén a distancias también mayores. Este fenómeno se conoce como *recesión*. Este científico no solo pudo descifrar el “movimiento” de las galaxias, entre otras cosas determinó la existencia de muchas galaxias aparte de la Vía Láctea. Para ello necesitó estimar las distancias a las que se encontraban y lo realizó utilizando diferentes métodos. Para ello se basó en el supuesto de que el brillo que emiten las estrellas y los cúmulos estelares, depende de su luminosidad propia, y de cuán lejos están de nosotros.

Con ello logró calcular las distancias desde nuestra galaxia a otras 9 galaxias distintas de la nuestra. El descubrimiento de la recesión de las galaxias no solamente constituyó una herramienta descriptiva sino que también permitió comenzar a conocer la velocidad con la que se “mueven y alejan”, tanto las estrellas de la Vía Láctea como algunos sistemas externos de estrellas perteneciente a galaxias y cúmulos de galaxias.

Aclaremos que desde el punto de vista de la Teoría de la Relatividad, la recesión de las galaxias no significa un movimiento absoluto respecto de ningún punto de referencia en particular. Deberíamos pensar entonces en una especie de “estiramiento” del universo, una expansión global en la que no puede reconocerse un centro privilegiado, un comportamiento que queda descrito por la Ley Hubble.

## Friedmann y Lemâitre

Los descubrimientos experimentales de la física del siglo XX han sido fundamentales en el avance del conocimiento del cosmos. También fue necesario

someterlos a la labor interpretativa de los físicos teóricos que intentaron e intentan aún encontrar la relación entre aquellas pruebas empíricas y sus alcances. En muchos casos los avances teóricos direccionaron las líneas investigativas; en otros, se dio el proceso contrario: los desarrollos observacionales y experimentales sustentaron el campo de las conjeturas e hipótesis.

La Teoría de la Relatividad de Einstein constituyó un marco conceptual importante, pero no fue tenida en cuenta hasta que años más tarde la investigación científica proporcionó los primeros elementos que avalaron las predicciones que se derivaron de ella, como aquellos que explicaban aspectos evolutivos del universo. En muchas oportunidades, esta teoría ha precedido a la experimentación, o ha dado pautas predictivas de investigación, y esta ha contrastado tales versiones preliminares. ¿Cómo entender el espacio y el tiempo? ¿Es accesible arribar al conocimiento del origen de todo? Este es un dilema que no parece resolverse sólo desde la especulación. Cada vez más nos aproximamos a un modelo que aclare nuestro propio entendimiento, o que en su defecto nos brinde una versión explicativa que en una perspectiva combinada nos dirige a un panorama teórico-observacional convincente.

¿Podrá algún día la Cosmología llegar a tal destino? Hoy en día la respuesta a esta pregunta es clara: falta mucho por recorrer. Aun los avances en teorías gravitatoria, cuántica y de la relatividad no han sido suficientes. El trayecto teórico analítico de la Teoría del Big Bang fue iniciado por el matemático ruso Aleksandr Friedmann (1888-1925) y, separadamente, por el clérigo y astrofísico belga George Le Maître (1894-1966). El primero se abocó al estudio de las ecuaciones de Einstein, que lo condujeron a revelar el carácter posiblemente dinámico del universo a partir de las relaciones gravitatorias. El segundo, proporcionó algunas explicaciones de las ecuaciones de Einstein a la luz de las observaciones de Hubble, llegando a determinar la expansibilidad o contractibilidad en términos predictivos, del universo. Hasta ese momento era concebido como estático, de hecho, el mismo Einstein introdujo arreglos a sus ecuaciones para compensar el efecto gravitatorio que predecían sus ecuaciones sobre la masa del cosmos. Agregó un parámetro llamada constante cosmológica *Lambda* que se debía interpretar como una fuerza restrictiva de la distribución dinámica de la materia, es decir, tenía que ver con la estructura del universo.

De todas maneras *Lambda* ha tenido gran variedad de interpretaciones muy distintas a las pretendidas por Einstein. Algunos físicos la asocian más precisamente con la materia, la energía o las distancias entre los cuerpos celestes. Hoy en día es una constante que ha vuelto a ser relevante y está siendo objeto de

estudio en la comunidad científica cosmológica, ya que al parecer tiene implicancias con respecto a los cálculos de tamaño del universo. Previamente a las observaciones astronómicas, Friedmann puso en discusión aspectos pertinentes a la densidad de energía, a la temperatura del mismo y a debates en torno a la posibilidad de un radio nulo.

## Nucleosíntesis atómica. Materia bariónica y no bariónica

Recordemos que el modelo atómico actual, es un modelo probabilístico descrito por la Mecánica Cuántica. Los modelos son representaciones que intentan explicar el funcionamiento de algunos sistemas o aspectos reduciendo la realidad, simplificándola, para posibilitar un modo de entendimiento. En este caso es una descripción matemática según la cual los átomos están constituidos por una región central (denominada núcleo), formada por neutrones y protones, (genéricamente nucleones, que, como ya lo explicáramos en el apartado dedicado a las partículas subatómicas se mantienen unidos en interacción nuclear fuerte); y una parte periférica alrededor de dicho núcleo constituida por los electrones en movimiento (esta región indefinida es llamada orbital). Estos representan zonas de máxima probabilidad de encontrar cada electrón y adquieren diferentes formas geométricas.

A finales de la primera mitad del siglo XX comienza a comprenderse que los núcleos de los átomos que se conocían en la época podían formarse en procesos propios de partículas nucleares como son neutrones y protones. Para ello es necesario reunir ciertas condiciones como lo son las muy altas temperaturas e intervención de grandes cantidades de energía. Imaginemos que contamos con los requerimientos básicos ya mencionados y que es posible a partir de una provisión de neutrones y de protones, “construir” los núcleos atómicos de los elementos de la tabla periódica en un laboratorio nuclear. Podríamos sintetizar los núcleos de los átomos comenzando por el del Hidrógeno (H) con un protón y algunos neutrones. Formar un núcleo de Helio (He) con 2 protones y 2 neutrones y ajustar la energía interviniente para que se logre la ligadura entre las partículas que hemos reunido.

Podríamos continuar de igual manera con el Litio (Li), luego con el Berilio (Be), con el Boro (B), con el Carbono (C), y así sucesivamente hasta obtener el resto de los elementos más pesados de la tabla, aumentando la energía y la temperatura puesto que cada clase atómica requiere cantidades particulares de calor

para su formación. Esta precisa incrementarse de acuerdo al peso de los núcleos que deseamos sintetizar. Este proceso físico se denomina *nucleosíntesis* y si se trata de elementos livianos tales como los primeros que hemos mencionado, se dice que es una *nucleosíntesis primordial*.

Conviene aclarar que la síntesis primordial de núcleos atómicos no representa una clasificación arbitraria sino que responde a ciertos parámetros relacionados con lo que se denomina *densidad crítica*. Al hablar de densidad crítica los astrofísicos se refieren a cantidades particulares de materia-energía por unidad de volumen<sup>1</sup>. Entonces se establecen cotas superiores a dichas cantidades para las cuales es permitido sintetizar los diferentes elementos. El valor de densidad crítica de referencia se toma actualmente como la masa de un átomo de hidrógeno por metro cúbico.

Para densidades fuera de tales rangos no sería posible la formación de Hidrógeno, ni Helio ni Litio. Los núcleos más pesados se sintetizan en las estrellas. Pensemos entonces que el universo presenta entre un 5 % y un 10 % de materia bariónica. En tal sentido, diremos que es el máximo tenor de protones y neutrones en lo que conocemos como materia ordinaria visible. Desde el punto de vista experimental, se han podido realizar observaciones que lo avalen pero del resto de la materia, que por deducción diremos que es no bariónica, de la cual no hay pruebas experimentales, es la denominada *materia oscura*.

## La radiación cósmica de fondo y la teoría del universo estacionario

Anteriormente imaginamos un laboratorio de actividad bariónica en el que nosotros mismos participábamos. George Gamow (1904-1968) fue un físico y astrónomo ucraniano que realizó experiencias de manipulación de protones y neutrones para formar átomos, al igual que las que ensayáramos en nuestras rutinas imaginarias, con la salvedad de que éstas fueron llevadas a cabo en condiciones reales.

A mediados del siglo XX las concepciones de Lemaître de un estado inicial del universo diminuto, caliente y denso (*Átomo Primigenio*), no era del todo acep-

---

<sup>1</sup> Sabiendo que la densidad masa-energía del universo es variable en distintas regiones de éste, los astrofísicos han decidido definir una nueva medida de referencia denominada Parámetro Omega, que resulta de dividir una cantidad particular de materia-energía con la densidad crítica.

tada debido a que sus predicciones, respecto de las dimensiones y edad del universo, no coincidían con los cálculos efectuados por Hubble a partir de las velocidades de expansión (para éste, el universo no poseía más de 2.000 millones de años, lo cual era improcedente puesto que se sabía que la Tierra era más antigua, se calcula en 4500 millones de años).

Este hecho fue significativo, puesto que dieron crédito a una nueva teoría llamada del *Estado Estable*, del *Estado Estacionario* o *Steady State*. Según esta concepción, postulada por Fred Hoyle (1915-2001), matemático y astrofísico británico, a partir de sus trabajos acerca del origen de los átomos de Nitrógeno, Carbono, y otros elementos de la tabla periódica, el universo existió desde siempre sin principio ni fin, con idéntica densidad media y temperatura. Hoyle pudo explicar la formación de la mayoría de los elementos mediante el mecanismo de nucleosíntesis como resultado de la fusión de núcleos de Hidrogeno y de Helio en una intensa actividad en el núcleo de las estrellas. Pero sus observaciones no tenían una justificación a la existencia previa de aquellos elementos-ingredientes ni podían explicar por qué el universo no estuviera en la actualidad algo más "diluido" puesto que la expansión era un hecho observado y firmemente comprobado. El Hidrógeno y el Helio, según sus desarrollos, debieron existir entonces eternamente surgidos en creación espontánea.

Uno de sus opositores fue justamente George Gamow, quien se abocó a desentrañar las dificultades teóricas surgidas en torno a las especulaciones de Lemaître, y sugirió que los núcleos de tales elementos debieron formarse a temperaturas mayores que las de las estrellas, en los momentos iniciales o muy próximos a los correspondientes a la primera expansión del super-átomo (de Lemaître). En sus desarrollos experimentales notó que el fenómeno de nucleosíntesis daba como remanente una emisión de energía radiante. Aseveró que, de haberse producido una formación de núcleos atómicos en alguna etapa posterior a la del Átomo Primigenio, la luminiscencia resultante no pudo haberse enfriado aún puesto que se trató de una enorme cantidad de energía que debió atravesar rápidamente todo el universo y cuyos "ecos" se expandirían por mucho más tiempo.

Analizando esa radiación junto a sus alumnos Ralph Alpher (1921-2007) y Robert Herman (1914-1997), concluyeron que se trataba, además, de la causa por la cual las reacciones de nucleosíntesis primordial no fueran consumidas en la producción posterior de núcleos más pesados. Estas afirmaciones se basaron en la gran abundancia de Hidrogeno (75% de la materia bariónica), y Helio (20 % de la materia bariónica). Hoyle, irónicamente comenzó a referirse en los medios de comunicación al conjunto de ideas sostenidas por sus contrincantes nombrándolo-

las despectivamente como *Big Bang Theory*, o en su equivalente en español, Teoría de la Gran Explosión.

Durante los años '60 fueron corregidos los cálculos efectuados por Hubble y en 1965 Arno Penzias (1933-) y Robert Wilson (1936-), dos científicos norteamericanos de telecomunicaciones trabajando para los Laboratorios Bell, en la prueba de nuevas antenas y obtención de ondas satelitales, detectaron un ruido atmosférico que se podía captar desde todas direcciones y al que no pudieron explicar. El radiotelescopio Bell recibía una radiación superior a la esperada. Sospecharon de interferencias provenientes de la cercanía con la ciudad de Nueva York, e incluso con dificultades generadas por los excrementos de las aves que se alojaban en la antena. Habían descubierto accidentalmente las radiaciones cosmológicas de fondo con una temperatura próxima a 4 K, un valor muy similar al predicho por Gamow y su equipo.

Retornemos a la nucleosíntesis. ¿Cómo pensar este proceso fisicoquímico? Según los astrofísicos, una vez formada la materia bariónica y estabilizada la "producción" de los primeros elementos livianos neutros, por enfriamiento del complejo atómico sintetizado, se detiene el proceso inverso por el cual simultáneamente se destruyen dichos núcleos. Es precisamente en ese momento en el que la energía se "desprende" de la materia y se libera con gran velocidad, inundando el espacio y haciéndolo visible y transparente. Se dice entonces que el espacio que rodea a dicha materia se torna cristalino y traslúcido, se ilumina en todas direcciones y sentidos con iguales características (isotropía).

La radiación cósmica de fondo de microondas es desde aquellos años la piedra fundamental de la cosmología, puesto que desde su descubrimiento aportó las bases científica más sólidas que elevaran a la categoría de ciencia experimental a esta rama de la Física. Permitió unir, además, una serie de hechos observacionales con las contemplaciones teóricas, las cuales se mantenían en la condición de opinión todavía, y con las discusiones de la época. Comenzó en ese periodo un mecanismo de ensamblaje de distintas piezas del saber, y junto con ello el conocimiento más acabado de los modelos del Big Bang, sin que esto signifique una oposición a la evolución del conocimiento y sus formas de producción. La ciencia cosmológica inicia una nueva etapa en la que se fortalece su cuerpo teórico con "nuevas verdades empíricas", que en ningún sentido pueden concebirse irrefutables.



## CAPÍTULO IV

# La Teoría del “Big Bang”

David Merlo

*“En realidad, hemos redefinido la tarea de la ciencia como el descubrimiento de leyes que nos permitan predecir acontecimientos hasta los límites impuestos por el principio de incertidumbre. Queda, sin embargo, la siguiente cuestión: ¿cómo o por qué fueron escogidas las leyes y el estado inicial del universo?”*

*(Stephen Hawking 1992:..221)*

La teoría del Big Bang, en sus diferentes modelos, describe la evolución del Universo que conocemos actualmente a partir de un estado de presión y densidad extremas, cuando tenía un tamaño muy reducido que escapa a la comprensión humana.

Sin embargo, la “Gran Explosión” no significa lo que parece: un evento catastrófico y singular ocurrido hace catorce mil quinientos millones de años en un punto particular del espacio y que a partir de ello se inició la expansión del Universo. Conviene prevenirte lector que esta teoría no explica el origen del Universo ni lo que había antes del inicio de todo, si bien para elaborar hipótesis y conjeturas (dejando de lado la fantasía y la ciencia ficción) el intelecto humano ha contribuido desde los mismos orígenes de la humanidad.

Con el establecimiento de la teoría de la Relatividad, la variable temporal adquirió un rol dimensional del mismo rango que las otras tres espaciales, definiendo una geometría un tanto diferente a la absoluta y estática de la Física Clásica,

cobrando entonces un carácter dinámico que permite aceptar que en esa singularidad primigenia ocurrió un evento que inició una expansión geométrica en cuatro dimensiones cuya evolución y consecuencias explicaría lo que se observa hoy.

Como se mencionó en el capítulo III, la radiación cósmica de fondo descubierta por Penzias y Wilson en 1965, proveyó la primera evidencia de que el Universo transcurrió por una fase primitiva densa y caliente. Asimismo, también se describió que los modelos de Friedmann predijeron que la densidad de masa-energía era extremadamente alta en épocas primitivas del mismo.

Tal como lo propone la Teoría del “Big Bang”, en este capítulo nos acercaremos a los momentos iniciales del origen de nuestro Universo y cómo se fue desarrollando y evolucionando el mismo, los problemas que presenta y se tratan de corregir, la forma en que se “parametriza” o cuantifica tal expansión y cómo se condice con la realidad observada, siendo esta última la jueza inapelable de toda teoría científica.

Para empezar a entrar en tema, como un ejercicio de precalentamiento mental, recordemos primeramente que el Sol es un plasma de Hidrógeno, Helio y otros elementos (neutros y/o ionizados, de acuerdo a la zona que analicemos); también sabemos que la estabilidad de los núcleos atómicos no pueden soportar temperaturas que corresponden a unos pocos millones de *electrón-volt* de energía, por lo que se descomponen en partículas elementales que aún a mayores temperaturas se descomponen en constituyentes aún más elementales, bajo condiciones parecidas a las que encontramos en los colisionadores de partículas de alta energía. Por lo tanto, la comprensión de la Cosmología requiere que se estudien las leyes y fenómenos de plasmas a muy alta temperatura, durante una era que llamaremos de “radiación temprana”.

Asimismo recordemos, también, que el movimiento de partículas cargadas en interacción electromagnética se describe por las ecuaciones de Maxwell y de Lorentz. El movimiento de una partícula en un campo central de fuerzas  $\vec{F}$ , por ejemplo un electrón de carga  $e$  que se mueve a una distancia  $r$  de un protón, viene expresada por la ley de Coulomb  $|\vec{F}| \propto \frac{e^2}{r^2}$ . Seguramente nos habrá causado interesantes procesos de reflexión el hecho de que esta ley tenga la misma forma que la ley de la gravitación de Newton,  $|\vec{F}| \propto \frac{mM}{r^2}$ . Las constantes de proporcionalidad se expresan en unidades físicas diferentes porque se aplican a sistemas de tamaños diferentes. Para la física de la radiación, la interacción gravitatoria puede ser despreciada por completo; sin embargo, en el estudio de la dinámica de la expansión del Universo, sólo la interacción gravitatoria es importante porque los cuerpos celestes son eléctricamente neutros.

## Descripción matemática

Albert Einstein (1879-1955) postuló que dada una distribución de materia y energía representada por el tensor energía-impulso<sup>1</sup>  $T^{ij}$ , el espacio de Riemann que representa al campo gravitatorio queda determinado por dos ecuaciones:  $S^{ij} = kT^{ij}$ ;  $T_{ij} = 0$ , siendo  $k$  la constante gravitatoria de Einstein. El problema central de la Relatividad General es encontrar soluciones a estas ecuaciones y hallar el tensor métrico fundamental  $S^{ij}$ . Combinando ambas ecuaciones e introduciendo el tensor de Ricci<sup>2</sup>  $R^{ij}$ , se arriba a la conocida ecuación siguiente:

$$R^{ij} - \frac{1}{2} R g^{ij} + \Lambda g^{ij} = kT^{ij} \quad (4.1)$$

Donde  $\Lambda$  es la denominada *constante cosmológica*, cuyo origen es matemático y desde un punto de vista físico es distinta de cero a grandes distancias cosmológicas.

Como estas ecuaciones no son lineales, admiten muchas soluciones difíciles de obtener, aunque el tema se ha venido facilitando con el uso de computadoras; sin embargo, las primeras soluciones históricas y más simples son las más utilizadas. Una de ellas, la obtenida en 1935 por Howard Robertson (1903-1961) y Arthur Walker (1909-2001), describe al universo físico como un todo.

Como vimos en el capítulo II, se observan en el universo que nos rodea agrupaciones de materia denominadas *galaxias*, las cuales presentan variadas morfología, y a su vez ellas se reúnen en *cúmulos de galaxias*, distribuidos en todas direcciones y distancias. Las separaciones promedio de estos objetos son enormes comparadas con sus dimensiones y entre ellas existe un vacío prácticamente absoluto, por lo que podemos considerar al universo como un gas cuyas moléculas son las galaxias. Estas consideraciones llevaron a postular el *principio cosmológico*, el cual establece que el universo es *isótropo* y *homogéneo*. Esto quiere decir que si dos observadores intercambian sus posiciones, sus descripciones serían equivalentes.

Vale la pena comentar que cuando Einstein estableció la Relatividad General en 1916, no se conocía la expansión del universo, ya que ésta fue establecida en forma observacional en 1929 por Edwin Hubble (1889-1953) y Milton Humason

---

1 Cantidad tensorial que se usa en la Teoría de la Relatividad General para describir el flujo de energía y el momento lineal de una distribución continua de materia.

2 Introducido en 1903 por el matemático italiano Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925), es un tensor simétrico bivalente obtenido como una traza del tensor de curvatura, definido en cualquier variedad dotada de una conexión afín.

(1891-1972), ya que se lo creía hasta ese momento estático. Tal es así que incluyó la constante cosmológica  $\Lambda$  en la ecuación (4.1) para contrarrestar la expansión del universo que sus ecuaciones predecían, anticipándose a ella por más de una década. Luego Einstein comentaría que fue el mayor error en su vida...

Utilizando la métrica de Robertson-Walker-Friedmann, las ecuaciones de Einstein se reducen a las siguientes:

$$\kappa c^2 r = \frac{3\left(\kappa c + \left[\frac{dR}{dt}\right]^2\right)}{R^2} - \Lambda \quad (4.2)$$

$$c^2 \frac{d(\rho R^3)}{dt} + p \frac{d(R^3)}{dt} = 0 \quad (4.3)$$

Donde la presión  $p$  y la densidad  $r$  son funciones del tiempo  $t$  y  $k$  depende del tipo de universo adoptado: +1 (esférico), 0 (plano), -1 (hiperbólico).

Como el sistema de ecuaciones de las ecuaciones (4.2) y (4.3) resulta indeterminado, se adopta una ecuación de estado  $p = p(r)$ , la cual adopta un valor nulo en la actualidad y muy concentrada en sus orígenes, obteniéndose una solución  $R(t)$  que determina la evolución temporal del universo. Asimismo, en el límite cuando  $R \rightarrow 0$  se obtiene:

$$R(t) \approx t^{\frac{1}{2}} \quad \rho(t) \approx t^{-2} \quad p(t) \approx t^{-2} \quad (4.4)$$

De estas expresiones se observa que para  $t = 0$ , tanto la presión como la densidad se hacen infinitas: *es como si en ese instante inicial ocurriera una gigantesca expansión*. Esto constituye la **Teoría del "Big Bang"**. Además, se puede notar que en esta etapa del universo primitivo no interviene la constante de curvatura  $k$ , es decir, es *independiente de la geometría* adoptada para el mismo.

En un universo de Friedmann-Lemâitre, el parámetro de densidad total  $\Omega_0$  está convenientemente dividido en tres términos: uno de materia, otro de radiación y un tercero correspondiente a la constante cosmológica, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda \quad (4.5)$$

El apartamiento de  $\Omega_0$  al valor de 1 (es decir,  $\epsilon = \Omega_0 - 1$ ) se denomina "energía del vacío".

## El Modelo Estándar

Se llama modelo estándar a aquél que resulta de aplicar las ecuaciones de Friedmann a nuestro universo, lo que conduce a la homogeneidad e isotropía espaciales, la validez de la Teoría de la Relatividad General y la persistencia de las densidades de energía (esto implica la no existencia del fenómeno de inflación, que veremos más adelante).

Las observaciones actuales permiten establecer las siguientes características del modelo estándar:

- Constante de Hubble:  $H_0 = 65-72$  km/s/Mpc, el valor inferior deducido de las lentes gravitacionales y el superior a partir de observaciones del telescopio espacial Hubble.
- Curvatura del espacio nula, obtenido de las anisotropías halladas en el fondo cósmico de microondas por los satélites COBE, WMAP y Planck.
- Universo compuesto de radiación, materia no relativista y constante cosmológica no nula.
- Densidad de materia no relativista: 0,5 % de materia bariónica emisora, 3,5 % de materia bariónica no emisora y 26 % de materia no bariónica no emisora (materia oscura), que totaliza  $\Omega_m = 0,3$ . Estos valores son deducidos a partir del estudio de los cúmulos de galaxias.
- Densidad de energía de radiación:  $\Omega_r = 0,0001$ , deducida a partir de la medición de la radiación del fondo cósmico de fotones (añadiendo los neutrinos). Resulta despreciable frente a la materia y al valor de la constante cosmológica  $L$ .
- $\Omega_L = 0,7$ , deducida a partir de la curvatura nula del espacio que indicaría la anisotropía de la radiación de fondo y la expansión acelerada provistas por las distancias medidas en las supernovas tipo Ia, lo que implica la presencia de una energía oscura necesaria para alcanzar la densidad crítica.

Si se combina las ecuaciones de estado de la radiación, de la materia no relativista y de la materia oscura, la expansión del Universo comenzó en forma desacelerada y luego se aceleró, con un punto de inflexión a *redshift*<sup>3</sup>  $z = 0,67$ .

Para una constante de Hubble de  $H_0 = 65 \text{ km/s/Mpc}$ , el Modelo Estándar conduce a una edad del universo de  $14,5 \cdot 10^9$  años, consistente con las edades deducidas de los cúmulos globulares y que favorece la hipótesis de la energía oscura (en ausencia de tal, conduciría a una edad 16 % menor), pero si se adopta el valor de  $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$ , la edad resulta de  $13,7 \cdot 10^9$  años, consistente con las mediciones del satélite WMAP.

## La Singularidad Inicial

### Rastreando los orígenes

El *antes*, el *durante* y el *después* caracterizan, de por sí, a todo sistema determinista; sin embargo, a la hora de la descripción matemática de tal proceso, muchas veces se recurre a ciertos artilugios que, a pesar de causar cierta perplejidad *a priori*, a la postre resultan tan elegantes y convincentes que luego nos acostumbramos rápidamente a ellos<sup>4</sup>. Empero, cuando tenemos que describir el “origen de todo”, aquella sucesión temporal parecería carecer de sentido.

Con el objeto de indagar en esta génesis, en los primeros años de la década de los ‘80 del siglo XX el físico italiano Carlo Rubbia gozaba de la atención cientí-

---

3 Corrimiento de la frecuencia electromagnética hacia valores menores debido a que el emisor se encuentra en movimiento relativo respecto al observador (con rapidez  $v$  formando un ángulo  $q$ ) debido al efecto Doppler. Matemáticamente, su expresión general viene expresado por  $1 + z = \frac{1 + \frac{v}{c} \cos q}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , siendo  $c$  la rapidez

de la luz en el vacío. Desde el punto de vista de la Cosmología, se interpreta que es el espacio el que se está expandiendo y produce tal corrimiento, por lo que al mismo se le suele llamar corrimiento al rojo cosmológico y viene expresado por  $1 + z(t) = \frac{a(\text{hoy})}{a(t)}$ , siendo  $a$  el factor de escala cosmológico.

4 Quizás el ejemplo más famoso sea la delta de Dirac, límite puntual de una sucesión de funciones de distribución introducida ad-hoc por el físico inglés Paul Dirac (1902-1984), que representa un impulso “infinito instantáneo” y localizado en el espacio, con energía finita. Sus propiedades simplifican magistralmente aquellos fenómenos físicos de gran impacto y de muy corta duración.

fica mundial. El entonces instrumento "estrella" en el CERN<sup>5</sup> era el colisionador de protones-antiprotones (formado por un tubo en forma de anillo de varios kilómetros de circunferencia instalado en cavernas subterráneas, por donde se hacían colisionar partículas con rapidez relativista mediante campos electromagnéticos bidireccionales), el cual estaba siendo utilizado para buscar un nuevo tipo de partícula (predicha décadas atrás) mediante colisiones de alta energías: el mensajero de la fuerza débil<sup>6</sup> (W-). A mediados de enero de 1983 el momento ansiado llegó...en conferencia de prensa se anunció su descubrimiento. Dos décadas atrás cada una de las cuatro fuerzas fundamentales se ocupaban de una teoría distinta, pero de ellas solo una, la Electrodinámica Cuántica<sup>7</sup> funcionaba correctamente. El descubrimiento experimental de la partícula W- cerró un círculo conciliador entre teóricos y experimentales.

Con la Teoría Cuántica de Campos<sup>8</sup> se comprendió que el "vacío" no era lo que, durante mucho tiempo, (quizás) intuitiva o ingenuamente se creía: una gran región de espacio libre de partículas, campos y ondas. Los físicos aprendieron que podían aparecer partículas "de la nada" con energías a muy corto plazo y, por lo tanto, de vida muy corta. Si bien no pueden verse, pueden dejar ciertos rasgos; actúan como "partículas virtuales" similares a las mediáticas W-, pero nada transmiten ni emiten, "sienten" pero no "comunican".

Esto cambió significativamente el concepto de vacío inerte e inocuo, transformándolo en una plétora de partículas virtuales; y más aún, ni el mismo estado de reposo lo es en sí mismo, debido al intrincado "enjambre" de partículas virtuales alrededor. Y si el vacío estaba "lleno" de partículas virtuales, ¿por qué no pensar en diferentes estados de energía también? Y así surgió el concepto de

---

5 CERN es el acrónimo del Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Consejo Europeo para la Investigación Nuclear). Fundada en 1954 con sede en Ginebra (Suiza), representa el centro de investigación en Física de Partículas más importante del mundo.

6 Los físicos reconocen cuatro fuerzas fundamentales: gravitatoria, electromagnética, fuerza débil y la fuerza nuclear fuerte (o gluón). La búsqueda de la unificación de ellas en una sola teoría sigue siendo hoy uno de los "santo grial" de la Física.

7 Teoría que describe los fenómenos que implican las partículas eléctricamente cargadas que interactúan con los fotones por medio de la fuerza electromagnética. En 1965, Tomonaga (1906-1979), Schwinger (1918-1994) y Feynman (1918-1988) recibieron el Premio Nobel de Física por sus contribuciones al desarrollo de la misma.

8 En ella, se aplica los principios de la Mecánica Cuántica a los sistemas de la Física Clásica de campos continuos (p.ej. campo electromagnético), haciéndolo equivalente al de un sistema de partículas con densidad variable (admitiendo la creación y aniquilación de las mismas).

“estados excitados del vacío”. ¿Y si en uno de estos estados<sup>9</sup> del universo actuara una fuerza de repulsión cósmica de tal magnitud que provocara una inmediata y colosal expansión (similar al modelo imaginado por de Sitter explicado en el capítulo III) salvo que su expansión no fuera tranquila sino que lo hiciera duplicando su tamaño cada  $10^{-34}$  segundos? Esta expansión descontrolada fue bautizada como “inflación” en 1981 por Alan Guth (1947- ) y representa lo que se conoce como modelo inflacionario.

## ¿Coordenadas del “Big Bang”?

Todos nos preguntamos alguna vez dónde habría sucedido el “Big Bang”, con nuestra concepción de espacio-tiempo que nos permite especificar alguna dirección en él y señalar “¡fue allí hace catorce mil millones de años!”. Quizás el nombre de este fenómeno cosmogónico nos anime a suponer un evento explosivo acompañado de uno expansivo a partir de algún punto de ignición. Lamentablemente esto no es tan simple y la respuesta dejaría a muchos entusiastas del tema completamente perplejos: *ocurrió en todas partes y en ninguna parte*.

Aclaremos esta última expresión. Existe un principio cosmológico que afirma que ningún punto en el Universo es especial. Si existiera un lugar donde hubiera sucedido el “Big Bang”, claramente sería “muy especial” y contradeciría tal precepto. Más aún, tanto el espacio como el tiempo en sí mismos son hermanos gemelos, ya que fueron creados simultáneamente en dicho suceso, mientras que un evento explosivo implicaría una expansión de materia en un espacio ya existente. Por lo tanto, si elegimos un lugar en el Universo y pudiéramos volver el tiempo hacia atrás, llegaríamos al punto inicial de tal “explosión” y, en este sentido, el “Big Bang” ocurrió en todo punto del espacio. Por otro lado, la ubicación del “Big Bang” no tiene sentido porque el espacio en sí mismo ha ido creándose y expandiéndose y modificándose a partir de este evento, por lo que hoy (con algún sistema de coordenadas actual) no sería posible especificar el lugar donde se inició todo.

Una interesante y simple interpretación bidimensional de esto la proporciona Liddle (2003) al imaginar al universo como una esfera en expansión: en cualquier

---

9 A estos estados metaestables sin campos ni partículas pero con elevadas densidades de energía se los denominan “falsos vacíos”. Algunos autores recientemente comenzaron a utilizar una noción generalizada de falsos vacíos, definiéndola como un estado similar al vacío con una densidad de energía que cambia lentamente. La diferencia entre esta definición y la estándar es muy sutil, pero permitió resolver todos los problemas de la vieja teoría inflacionaria como veremos más adelante.

instante el espacio sería la superficie de la misma, la cual se incrementa con el tiempo. El “lugar” donde empezó la expansión sería el centro de la esfera pero, como sabemos, dicho punto no pertenece a la esfera donde estamos nosotros. Por lo tanto, como vivimos sobre ella no tenemos acceso (información) al centro de la misma, el origen de la “gran explosión”; sin embargo, todos los puntos de la esfera fueron alguna vez el centro de la misma, es decir, el lugar donde habría ocurrido el origen del universo.

## Cronología Universal

### Preliminares

El conocimiento actual que se dispone de la historia del universo muestra periodos de duraciones irregulares entre las etapas iniciales y las más actuales. En ciertos aspectos parecerían mostrar un comportamiento inverso y muy diferente al desencadenamiento de los periodos históricos de la Humanidad, desde aquellos largos periodos iniciales correspondientes a los inicios de las civilizaciones y los periodos más cortos y actuales. Partiendo de un “universo primordial”, donde reinaba la radiación, del cual se elaboraron muchas hipótesis ya que no se disponen de evidencias concretas y donde primaron las partículas subatómicas, pasando por el “universo temprano”, en donde la materia empezó a organizarse en estructuras, finalizando posteriormente en el “universo actual” y contemporáneo.

Vale la pena recordar que hasta ahora<sup>10</sup> toda la información que recibimos del universo proviene de la radiación electromagnética, la cual se clasifica según el valor de su frecuencia y, asociada a ella, la energía correspondiente. Asumiendo la ley de radiación de cuerpo negro<sup>11</sup> de Planck, se puede correlacionar cada intervalo de frecuencias (energías) con un rango de valor de temperatura del medio que la produce, identificando así las ondas de radio, las microondas, el infrarrojo,

---

10 Las ondas gravitacionales, predichas por la teoría de la relatividad, serían una nueva fuente de información, aunque tecnológicamente hoy inalcanzables. Sin embargo, el proyecto LIGO patrocinado por la National Science Foundation (USA) tiene por objetivo diseñar, construir y operar un observatorio astrofísico para la detección y el estudio de este nuevo tipo de radiación. Merece comentarse, además, que se prevé la participación argentina en este consorcio internacional.

11 Es un objeto teórico e hipotético, el cual tiene la propiedad de absorber toda la energía de radiación que incide sobre él.

la luz visible u óptico, el ultravioleta, los rayos X y los rayos g. Como la historia del universo está fuertemente correlacionado con su temperatura, esta discriminación nos especifica qué tipo de radiación buscar para poder analizar valores de temperaturas definidos.

De acuerdo al Modelo Estándar, la verdadera “historia universal” se puede dividir en 3 grandes etapas o “eras cosmológicas”; la primera llamada la *Era de la Radiación*, con importantes cambios en periodos muy cortos de tiempo (algunos tan incomprensibles para nuestro entendimiento humano como el llamado *tiempo de Planck* que equivale a  $10^{-43}$  segundos); la segunda denominada la *Era de la Materia*, de la cual se tiene mucha información y pocas certezas, donde la materia dominó por sobre la radiación de fondo, se formaron y evolucionaron las estructuras más complejas; y la tercera llamada la *Era de la Energía Oscura*, donde la materia sigue estructurándose y surge la presencia gravitacional de la materia oscura.

## El Universo Primordial - Era de la Radiación

La fase más simple y mejor conocida es el periodo en el cual la radiación y la materia estuvieron en equilibrio, con la densidad de radiación dominando la densidad de materia. Durante este tiempo, el universo primordial se fue llenando con una mezcla uniforme de radiación y materia bajo condiciones físicas muy bien conocidas.

- **Época de Planck:** Los vestigios del tiempo se remontarían a los  $10^{-43}$  segundos luego del “Big Bang”, ocurrido hace aproximadamente catorce mil millones de años, en un entorno con temperaturas del orden de los  $10^{32}$  K, donde se presume que las cuatro fuerzas fundamentales (nuclear fuerte, nuclear débil, electromagnética y gravitatoria) estaban unificadas y no existían partículas

elementales. Aquí las teorías de cuerdas<sup>12</sup>, supercuerdas<sup>13</sup> y membranas<sup>14</sup> en conjunto con la llamada gravedad cuántica, explicarían un universo con tamaño del orden de los  $10^{-33}$  cm. A los  $10^{-36}$  segundos se produce una ruptura espontánea de la simetría, donde las fuerzas nucleares fuertes y electrodébiles se separan y dejan de ser una misma interacción.

- **Época de la Gran Unificación:** A los  $10^{-35}$  segundos después del "Big Bang", se inicia un periodo de expansión exponencial (en distancias, dentro de una métrica en un espacio de de Sitter) llamado *periodo inflacionario*. Con temperatura del orden de los  $10^{27}$  K, dominaron los llamados campos primordiales, es decir, aquellos que se formaron inicialmente, como así también aparecieron fluctuaciones cuánticas en el campo del *inflatón*<sup>15</sup>. Si realmente existieron los campos magnéticos primordiales, habrían influido en la evolución del Universo, por ejemplo, desviando su expansión en una dirección. Aquí debieron haberse formado grandes cantidades de monopolos magnéticos, los cuales se aniquilarían poco después (salvo una cierta cantidad que actualmente se trata de detectar). Resulta interesante comentar que estos campos primordiales habrían sido identificados; en efecto, en un trabajo publicado por Alecian y colaboradores (2009), los autores muestran evidencias observacionales de campos magnéticos primordiales en una muestra de estrellas de secuencia principal<sup>16</sup> de tipo espectrales A y B. A los  $10^{-33}$  segundos después del "Big Bang" finalizó el periodo inflacionario y se pro-

12 La Teoría de Cuerdas propone que el universo estaría compuesto fundamentalmente por objetos unidimensionales que son similares a una "cuerda". Estas cuerdas serían tan pequeñas que incluso en la diminuta escala de las partículas parecerían como puntos. En esta teoría, cada partícula es creada de alguna forma por diferentes patrones de oscilación de dichas cuerdas. Con ellas se logra superar los problemas de causalidad y limitaciones de la Teoría de la Relatividad.

13 La Teoría de Supercuerdas unifica las partículas y las fuerzas fundamentales como vibraciones de "cuerdas supersimétricas" delgadas moviéndose en un espacio-tiempo de más de 4 dimensiones.

14 La Teoría de las Membranas fue propuesta en 1995 por Edward Witten (1951- ) y unifica las cinco teorías de las supercuerdas. Identifica once dimensiones, donde la "supergravedad" (teoría de campo que combina principios de supersimetría y relatividad general) interactúa entre membranas de 2 a 5 dimensiones. Esto evidenciaría la existencia de infinitos universos paralelos, algunos de los cuales serían como el nuestro.

15 Partícula elemental introducida en 1981 y en forma independientemente por Alan Guth y Andrei Linde (1948- ), la cual sería responsable del periodo inflacionario.

16 Etapa evolutiva de las estrellas que transitan la mayor parte de su tiempo y se caracteriza por un estado de equilibrio entre la gravedad y el campo de radiación que emiten. El Sol se encuentra promediando este estado desde hace cinco mil millones de años.

dujo un *cambio de fase* en el universo recién creado, denominado *periodo de recalentamiento*. La energía del vacío responsable de la expansión dio origen a las partículas subatómicas y los fotones, comenzando la radiación a ser la especie dominante del universo. Debido a su crecimiento exponencial, cada porción del mismo (en una escala del tamaño de la longitud de Planck<sup>17</sup>) ha alcanzado tamaños del orden del metro. Aquellas variaciones cuánticas del periodo inflacionario forman irregularidades que provocará que la materia se empiece a aglutinar gravitatoriamente y formarán las simientes que originarán (en el futuro) las grandes estructuras de materia (galaxias). A los  $10^{-32}$  segundos después del “Big Bang” se inició la etapa de creación de los bariones (*periodo de bariogénesis*). Con temperaturas del orden de  $10^{26}$  K, aparece un ligero predominio de los protones (materia) sobre los anti-protones antimateria<sup>18</sup> ( $10^{-6}$  %), por lo que se podría decir que aquí se inicia la creación de la materia. A continuación parecería existir un periodo relativamente corto de calma, que va desde los  $10^{-35}$  a  $10^{-12}$  segundos, en donde disminuye considerablemente la temperatura hasta  $10^{16}$  K. Se cree que probablemente fue aquí donde se habría incrementado el número de partículas del Modelo Estándar, de forma que a cada partícula le correspondería una partícula “supersimétrica”, y de esta forma cada bosón tendría por “supercompañera” un fermión y viceversa<sup>19</sup>.

- **Época Electro débil:** A los  $10^{-12}$  segundos después del “Big Bang”, ocurrió una nueva transición de fase en la cual debido a la ruptura espontánea de la simetría, la interacción electro débil se desacopla en las interacciones nucleares débiles y electromagnéticas. Con temperaturas del orden de  $10^{15}$  K, las partículas electro débiles adquieren masa y nace el Electromagnetismo. Es a partir de este momento que se puede describir el estado del universo mediante

---

17 Es la distancia que limita los dominios de la geometría clásica y el de la gravedad cuántica. Equivale a la distancia que recorre un fotón, viajando a la velocidad de la luz, en el tiempo de Planck, siendo su valor aproximado de  $l_p \approx 1,6 \times 10^{-35}$  m.

18 “Otro” tipo de materia formada de antipartículas, la cual es menos frecuente. El contacto de ella con la materia ordinaria provocaría la aniquilación de ambas y la producción de fotones de alta energía (rayos  $\gamma$ ) y otros pares de partícula y antipartícula.

19 Los “supercompañeros” bosones tiene prefijos “s” y los “supercompañeros” fermiones se les asigna el sufijo “-ino”. Como aún no han podido ser creadas en los aceleradores de partículas, implicaría que sus masas deben ser mucho mayores que las de las partículas originales y, por lo tanto, la “supersimetría” seguiría “rota”. Es interesante destacar que algunas de estas partículas “supersimétricas”, como el neutralino, podrían explicar el problema de la materia oscura.

la física estándar bien conocida actualmente, con un tamaño del orden del sistema solar.

- **Época Hadrónica:** A los  $10^{-6}$  segundos después del "Big Bang", se inicia un proceso de aniquilación de electrones y positrones, debido a su diferente condición de materia. A los  $10^{-5}$  segundos después se recombinan los hadrones, formándose protones y neutrones a partir del plasma de *quark* y gluones. Estos están constituidos, respectivamente, por dos *quarks* "up" y uno "down" y por dos "down" y uno "up". Asimismo, debido a que la temperatura era del orden de los  $10^{12}$  K, algunos *quarks* desaparecieron por completo, tales como los "charm", "strange", "top" y "bottom", pudiéndoselos reproducir ahora en los aceleradores de partículas. Como los *quarks* "up" y "down" son más estables, forman parte de la materia ordinaria. Es recién a los  $10^{-4}$  segundos cuando los neutrinos pueden desplazarse libremente en un ambiente con temperatura del orden de  $10^{13}$  K. Los antiprotones aniquilan a los protones produciendo una gran cantidad de fotones en proporción a los protones y neutrones restantes. Este escenario está completamente explicado por la física estándar.
- **Época Leptónica:** Al segundo después del "Big Bang", la temperatura desciende hasta los  $10^{10}$  K, produciéndose un desacoplamiento débil entre los neutrinos cosmológicos del plasma primordial, en el sentido de que ahora la radiación se encuentra en forma de fotones, neutrinos y antineutrinos, y la materia en forma de electrones, positrones y una pequeña concentración de protones y neutrones (denominados nucleones), en una proporción aproximada de un nucleón por cada mil millones de partículas. El universo ha alcanzado un tamaño del orden de las decenas de años luz y todas las partículas están en permanente colisión, y a medida que se expandía disminuía la densidad de energía. Sus ingredientes constituían una sopa cósmica formada por partes iguales de fotones, neutrinos, muones tau y antipartículas, y pocos protones y neutrones.
- **Época Fotónica:** A los 5 segundos después del "Big Bang" se produce la aniquilación electrón-positrón, y la energía liberada sirve para aumentar (calentar) la energía de los fotones. Una evidencia actual de ello es que la radiación cósmica de fondo de microonda de 2,7 K es mayor que el fondo cósmico de neutrinos de 2 K. A partir de los tres minutos después del "Big Bang", los taunones y muones desaparecieron, los neutrinos recorrieron libremente el espacio creado, mientras que los fotones inician el periodo radiativo y el proceso de la *nucleosíntesis primordial*. En él, los núcleos de los átomos ligeros de

H pesado (Deuterio D o  $^2\text{H}$ ), interaccionan con protones para formar Tritio,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  y  $^3\text{Li}$ , de una manera uniforme y tan estable que aún hoy se observa. También se formaron los núcleos atómicos más livianos.

## El Universo Temprano – Era de la Materia

Un mes después del “Big Bang”, los procesos que convierten la radiación térmica (de cuerpo negro) se producen más lentamente que la propia expansión del universo. El fondo cósmico de microondas mantiene información de esta época. La materia poco a poco empieza a sentar presencia...

Diez mil años después del “Big Bang”, la temperatura ha caído a un valor de 25000 K. Se piensa que las irregularidades producidas por la materia oscura empezarían a colapsar para formar las semillas gravitatorias que darán origen a las grandes estructuras galácticas.

Cincuenta mil años después del “Big Bang” se habría alcanzado la igualdad entre la densidad de materia y de la radiación, con una temperatura promedio de 9500 K.

Cuando la densidad de energía de radiación deja de ser dominante, el universo pasa a estar energéticamente dominado por la materia no relativista; por ello se establece un “cambio de Era”. Bajo la hipótesis de una curvatura despreciable para el universo, resulta que el inicio de la misma se establece a los 61.000 años.

- **Época del Plasma:** sesenta y un mil años después del “Big Bang”, el universo está dominado por protones, electrones, neutrinos desacoplados y elementos ligeros procedentes de la nucleosíntesis primordial, formando un plasma acompañado por fotones. Se inicia con el dominio de la materia no relativista y finaliza con la combinación de los iones.
- **Época Atómica:** doscientos diez mil años después del “Big Bang”, los fotones ya desacoplados de la materia pueden viajar libremente; trecientos mil años después del “Big Bang”, la temperatura disminuye alcanzando valores del orden de los 3500 K. Aquí los electrones y protones se combinan formando átomos de H. La combinación del H se define como el momento en que queda un 10 % de electrones libres y la materia bariónica ordinaria (protones y neutrones) puede caer hacia los cúmulos de materia oscura. Estas irregularidades quedarán plasmadas en el fondo cósmico de microondas.

## El Universo Contemporáneo - Era de la Materia (cont.)

Cuando la materia se encuentra desacoplada de la radiación, empieza a organizarse mediante la gravitación universal. Por ello se inicia una etapa de formación de estructuras a distintas escalas en el Universo y, si bien son temas de estudio actual, pueden diferenciarse también épocas particulares.

- **Época Estelar:** dos mil seiscientos años después del "Big Bang" se formaron las primeras estrellas denominadas de Población III en nubes (halos) de baja masa ( $10^6$ - $10^7$  masas solares) que luego formarán a las galaxias. Estas estrellas fueron muy distintas a las observadas actualmente, ya que su materia prima carecía completamente de metales<sup>20</sup>. Esto produjo que se formaran estrellas de masas muy superiores a las que se observan actualmente, debido a que es precisamente la absorción de estos elementos lo que producen el balance radiativo-gravitatorio<sup>21</sup> que da origen a las estrellas, y sin ella la absorción es menor y permite el acopio de una mayor cantidad de materia. Son precisamente las estrellas más masivas (100-300 masas solares) las que ionizaron, calentaron y enriquecieron el medio circundante al finalizar sus días a través de los procesos de supernovas (ver capítulo II).
- **Época Galáctica:** se piensa que la formación de las estrellas primordiales finalizó aproximadamente doscientos millones después del "Big Bang". Paralelamente, se empezaron a formar las primeras galaxias como agrupamientos de materia oscura (materia fría con poca emisión de luz), estrellas y gas. A partir de las estrellas más masivas, las cuales evolucionaron en supernovas y devolvieron al medio interestelar el material sintetizado en sus núcleos (principalmente C, O, N, Si, Mg y Fe), surgieron una nueva generación: las estrellas de Población II, formadas mil millones de años después del "Big Bang" en los brazos espirales de las galaxias formadas, y hoy algunas de ellas han evolucionado en gigantes rojas y se encuentran distribuida sobre los halos de las mismas. Finalmente, las estrellas de formación más reciente (estrellas de Población I) se encuentran localizadas en una capa delgada que coincide con el plano de la galaxia a la cual pertenecen, en el cual se acumulan gas y polvo: de los procesos de condensación aún en curso nacen los nuevos astros visibles bajo la forma de estrellas azules.

---

<sup>20</sup> En Astrofísica, se llama "metal" a cualquier elemento químico distinto al Hidrógeno y al Helio.

<sup>21</sup> Llamado formalmente "equilibrio hidrostático".

- **Época Cumular:** Las galaxias, a su vez, se estructuran en forma de cúmulos de galaxias. Los primeros de ellos observados se piensa que se formaron cuando el universo tenía un 10 % de la edad actual.

## El Universo Contemporáneo – Era de la Energía Oscura

Actualmente se acepta que nuestro universo es euclídeo y que la mayor parte de su energía se halla en forma de energía oscura que provoca una expansión acelerada, lo cual provocaría que el mismo no colapse sino que se expanda por siempre (“muerte térmica”), si bien existen trabajos que ponen en duda este escenario.

Con los avanzados telescopios del siglo XXI, los cuales disponen de sofisticados sistemas de detección de luz y de análisis de las ondas electromagnéticas, ya es posible realizar mediciones de las distancias y distribución de las galaxias lejanas. Después de reunir datos de más de doscientas mil galaxias hasta distancias superiores a los ocho mil millones de años luz, se ha llegado a la conclusión que *la energía oscura realmente existe*.

El Nobel de Física 2011 entregado a los físicos estadounidenses Saul Perlmutter (1959-), Brian Schmidt (1967-) y Adam Riess (1969-), premió el hallazgo (en 1998) de que el universo se está expandiendo de forma cada vez más acelerada. Estos astrónomos estudiaron a las supernovas tipo Ia, las que se producen a consecuencia de la explosión de una estrella enana blanca (ver capítulo II). Según estos estudios, la energía oscura es una fuerza constante y uniforme que impregna todo el espacio.

- **Época de los Supercúmulos:** La formación de estructuras en el universo es un campo muy complejo y dinámico, el cual en las últimas décadas se ha visto fuertemente impulsado con la aparición de potentes computadoras que “simulan” estos procesos. Las primeras agrupaciones de cúmulos de galaxias, llamados supercúmulos, han sido observados a  $z = 0,9$ , por lo que se piensa que ya habrían existido en instantes anteriores, datándose el surgimiento de los mismos aproximadamente a dos mil millones de años después del “Big Bang”, continuando aún hoy. Nueve mil millones de años luego del “Big Bang”, se formó el Sistema Solar y el Sol, mientras que los diez mil millones de años aparecen las primeras formas de vida en nuestro planeta. Hoy, a casi quince mil millones de años después del “Big Bang”, la temperatura típica del universo es de 2,725 K. La esfera de  $10^{-33}$  cm en el tiempo de Planck se ha

convertido en otra que abarcaría del orden de  $10^{29}$  cm (cien mil millones de años luz), mil veces mayor al universo observable con los telescopios más potentes.

## El Futuro Oscuro del Universo

El futuro del universo, controvertido y en discusión actual, parecería conducir a una expansión ilimitada, la cual podría ser constante si la energía oscura constituyese parte de una forma hipotética de materia-energía del vacío (llamada "quintaesencia cosmológica"), con variaciones temporales y con un potencial gravitacional adecuado.

Con el dominio de la energía oscura se detendría progresivamente la formación de los supercúmulos de galaxias. A los  $10^{17}$  años después del "Big Bang", se enfriarían las enanas blancas, formando las llamadas "enanas negras", con temperaturas menores a 5 K. A los  $10^{19}$  o  $10^{20}$  años después del "Big Bang" las galaxias y sistemas estelares perderán su estructura normal y desaparecerían, por lo que las galaxias quedarían con el 10 % de su masa estelar. A los  $10^{23}$  años después del "Big Bang" los cúmulos de galaxias se disgregarán por completo por acción de la gravitación.

Entrando más en especulaciones teóricas, la teoría de la radiación de Hawking predice que entre los  $10^{66}$  a  $10^{102}$  años después del "Big Bang" se evaporarían los agujeros negros y que a los  $10^{1500}$  años la materia de los objetos restantes se transmutaría en Hierro, los cuales a su vez formarían nuevos agujeros negros que se evaporarían a los  $10^{10^{25}}$  años. Todo esto conduciría a un universo formado por partículas aisladas estables como fotones, electrones y quizás protones, con posibles fluctuaciones cuánticas que conduzcan la generación de un nuevo universo.

La Fig. 4.1 resume esquemáticamente los principales eventos en la historia del universo.

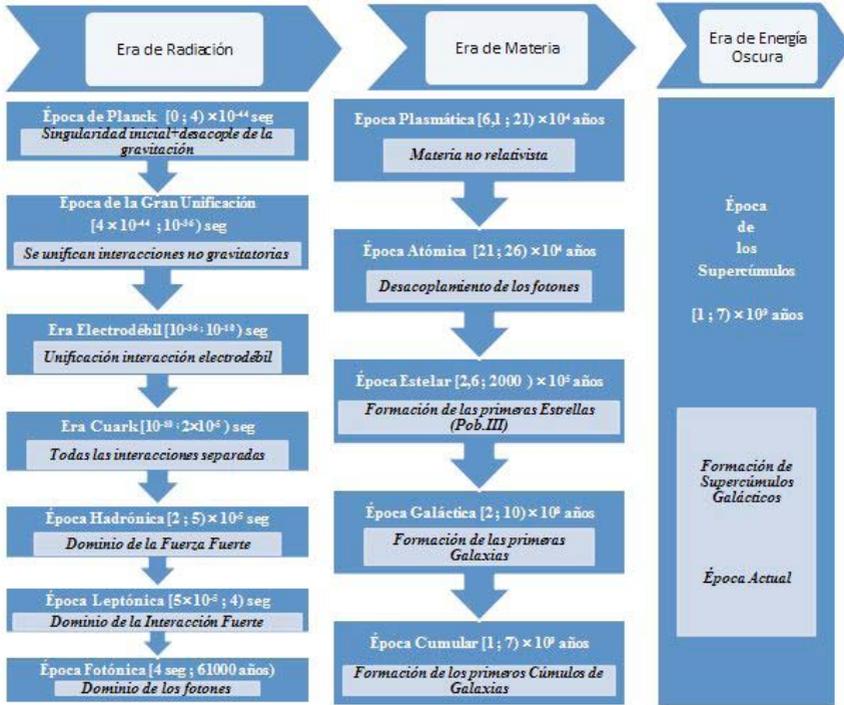


Figura 4.1 Representación esquemática y sintetizada de la historia del universo. Fuente: elaborado por David Merlo

## Los Problemas del Modelo Estándar

### Generalidades

El modelo estándar conjuga la Relatividad General y la Física de Partículas (abundancia de núcleos atómicos livianos) para explicar cualitativamente el corrimiento al rojo observado en las galaxias como una expansión del universo (Ley de Hubble), la radiación cósmica de fondo a través del equilibrio materia-radiación causadas en etapas de elevadas temperaturas, las abundancias de elementos atómicos livianos mediante la nucleosíntesis primordial, la asimetría materia-antimateria debida a una transición de fase con ruptura de esta simetría y las luminosidades de las supernovas de tipo Ia a distancias cosmológicas a través

de la energía oscura. Sin embargo, adolece de algunos problemas principalmente ligados con la determinación precisa de las condiciones iniciales, pero ello no la menoscaba pues estos tipos de problemas son comunes con toda teoría en proceso de elaboración y ajuste.

## Los Monopolos Magnéticos

Un problema del modelo estándar es la incapacidad de explicar fehacientemente los primeros instantes del universo por carecer de una teoría cuántica de la gravitación completa y firme. Otro problema son los inquietantes *monopolos magnéticos*, partículas que tienen únicamente un solo polo magnético y que en Cosmología es una candidata para suplir el faltante de masa que forma la materia oscura, ya que radia muy poco; por ser muy pesadas, la teoría predice que no deberían haber muchas de ellas, aunque otras ponen en duda el proceso de aniquilación monopolo-antimonopolo, justificando la baja densidad de las mismas y, por lo tanto, su no detección.

Los monopolos magnéticos fueron predichos por el modelo estándar de la Física de Partículas, y su excesiva densidad fue lo que dio lugar a los modelos inflacionarios del universo, ya que este proceso diluiría adecuadamente esta densidad.

## El Horizonte y la Planitud

Se llama horizonte al tamaño máximo de una región en la cual puede establecerse relaciones causales (causa-efecto) en los fenómenos descriptos. Cálculos teóricos demuestran que durante la fase en donde dominaba la radiación y para tiempos muy cercanos a la singularidad, esta región se contraería más rápidamente; dicho de otra manera, sobreabundarían zonas no relacionadas causalmente debido a la extrema anisotropía que el Modelo Estándar establece, basados en los datos de la radiación cósmica de fondo de microondas.

La radiación y la materia estuvieron en equilibrio térmico hasta el momento en que comenzó la recombinación del átomo de hidrógeno, luego del cual el universo se volvió transparente a la radiación. La actual isotropía mostrada por la radiación de fondo conduce a asumir una situación similar al momento de comenzar tal recombinación. Sin embargo, lo que se observa hoy es la misma distribución térmica de la radiación de las regiones que no tuvieron conexión causal en aquella época.

Se puede calcular en forma analítica la distancia entre dos puntos diametralmente opuestos en el cielo en unidades de la longitud de horizonte. Su valor queda en función del factor de escala, y es aquí en donde se puede modelar alguna ley de expansión del universo. Según el Modelo Estándar resulta un valor muy grande, pero el mismo cambia de una manera importante si se introduce cambios al factor de escala, por ejemplo el modelo inflacionario, que conduce a un valor significativamente menor.

Esta controversia recibe el nombre de “problema del modelo cosmológico estándar”, y se lo supera cambiando la perspectiva del análisis, esto es, planteando un sistema de referencia en la inflación, el cual predice un crecimiento exponencial del universo y explica también tanto la homogeneidad como la isotropía observada.

Por otra parte, de acuerdo a las observaciones se sabe que el actual parámetro que describe la densidad de materia ( $W_m$ ) se encuentra en un delicado equilibrio, ya que no puede desviarse de la unidad en un 10%, aunque recientes observaciones de la radiación cósmica de fondo ha reducido aún más esta discrepancia. Por lo tanto, para alcanzar el valor actual de aproximadamente 0,1, se necesitaría un ajuste muy fino de las condiciones iniciales en el tiempo de Planck del orden de  $10^{-60}$ . Para evitar este ajuste es que se asume que la parte espacial de la métrica es euclídea.

## La Inflación

- **Expansión inflacionaria:** El primer modelo inflacionario fue propuesto por Starobinsky (1979), estudiando anomalías en la gravedad cuántica y no tenía como objetivo resolver los problemas de homogeneidad e isotropía cosmológica, ya que lo prefijaba *ab initio*. En su haber tuvo el privilegio de ser el primero en predecir las ondas gravitacionales con un espectro plano y sirvió de base para que luego Mukhanov & Chibisov (1981) propusieran el primer mecanismo de producción de perturbaciones adiabáticas en la métrica con espectro plano responsables de la formación de galaxias. En 1981 también, Alan Guth propuso el ahora llamado “viejo” modelo inflacionario basado en la teoría de sobreenfriamiento durante las transiciones de fase cosmológicas; en él, la inflación es una expansión exponencial del universo en un estado de “falso vacío sobreenfriado”. ¿Podrías imaginarte un universo lleno de *nada* pesada? Cuando el universo se expande, el espacio vacío sigue vacío y su densidad de energía no cambia. El universo con una densidad de energía

constante se expande de manera exponencial, con lo que tenemos la inflación en el falso vacío. Esto convierte al universo en "muy grande" y "muy plano". Luego, el estado de falso vacío se desexcita en un nuevo cambio de fase que produce "burbujas" que se agrupan y forman nuestro universo caliente. Pero este modelo simple presenta fallas irreconciliables, ya que si estas burbujas se formaran lejos una de la otra, cada una representaría un universo separado y abierto con  $W @ 0$ , pero si se forman cerca entre sí, sus colisiones harían un universo inhomogéneo. Linde (1982) soluciona esta disyuntiva introduciendo la llamada "nueva teoría inflacionaria", postulando que la inflación puede comenzar tanto en el falso vacío como en un estado inestable por encima del potencial efectivo, al cual luego el campo del "inflatón" lo hará decaer al valor de su mínima energía potencial efectiva, produciendo una densidad de perturbaciones inversamente proporcional a la variación temporal del campo del "inflatón", lo que determina la homogeneidad de nuestro universo y no puede ser predicha por la otra teoría inflacionaria. Aunque resultó muy popular (y hoy se siga hablando de ella), también tuvo sus problemas, ya que solo funciona bajo condiciones muy particulares del mencionado potencial efectivo ("plano"). En sus diferentes versiones, el campo de inflación tiene una constante de acoplamiento extremadamente pequeña, lo que le provocaría no estar en equilibrio térmico con otros campos de materia. La teoría de las transiciones de fase cosmológica (base para la inflación "vieja" y "nueva") no funcionó en una situación así. Además, el equilibrio térmico requiere muchas partículas que interactúan entre sí. Esto significa que la nueva inflación podría explicar por qué nuestro universo inicialmente era tan grande sólo si era muy grande y con muchas partículas. Por último, en esta teoría la inflación empieza muy tarde; durante la época primitiva del universo, éste puede derrumbarse fácilmente o se puede volver tan inhomogéneo que inhibiría a la inflación.

- Estas modificaciones a la teoría del "Big Bang" fueron importantes, pero insuficientes. Se basaron en que el universo estuvo inicialmente en un estado de equilibrio térmico, era relativamente homogéneo y lo suficientemente grande como para sobrevivir hasta el inicio de la inflación, siendo ésta una etapa intermedia en la evolución del mismo. Las observaciones que se disponen del fondo cósmico de microondas conducen a pensar en un universo creado en un "Big Bang" caliente.
- **La Expansión Caótica:** postulando que la inflación tiene lugar aún con potenciales que siguen una ley de potencia arbitraria, en condiciones fuera

del equilibrio térmico en el universo primitivo y pudiendo iniciarse incluso a densidades de energía “planckianas” (que simplifican el problema), se lograba resolver todos los problemas de los anteriores modelos. Para un campo escalar<sup>22</sup> con un potencial cuadrático, con un mínimo en cero, presentaría una oscilación armónica para un universo estático; pero con un universo en expansión aparece un término de fricción o de viscosidad. Para valores iniciales altos del campo escalar, la fricción es grande y produce densidades de energía aproximadamente constante, lo que produce velocidades de expansión muchos mayores a la vieja teoría cosmológica. Como la escala del universo crece y el campo escalar evoluciona lentamente, aparece un crecimiento exponencial del tamaño del universo. Por lo tanto la inflación no necesitaría de un “super-enfriamiento” ni de “falsos vacíos”, convirtiendo la inflación no en una solución *ad-hoc* para solucionar los problemas de la teoría del “Big Bang” sino en un régimen cosmológico general. Analizando condiciones iniciales apropiadas conduce a cantidades extraordinariamente elevadas de inflación en  $10^{-30}$  s, seguida de una rápida oscilación del campo escalar con la consabida pérdida de energía que crea pares de partículas elementales, las cuales interactúan entre sí y producirán un estado de equilibrio térmico. A partir de aquí el universo puede ser descrito con una teoría del “Big Bang” usual. Nuestro universo es casi homogéneo a gran escala debido a que todas las inhomogeneidades fueron estiradas durante la inflación. La densidad de monopolos primordiales y otros indeseables defectos se diluyen exponencialmente por la inflación. El universo se hizo enormemente grande, por ello luce tan plano. Si nuestro universo consistió de muchas regiones (llamados “dominios”) con campos estelares distribuidos aleatoriamente, entonces los dominios donde los campos escalares sean muy pequeños nunca se expandirán. Entonces, los que contribuirán al volumen total del universo serán aquellos en lo que originalmente los campos escalares fueron grandes. La inflación de tales dominios crean “islas” enormes y homogéneas a partir del caos, de tamaños mucho mayores que las actuales zonas observables del universo actual. Es interesante aclarar que este escenario se alejaba mucho de la tradición típica de la teoría del “Big Bang” caliente y fue psicológicamente difícil de aceptar. Boubekur y Lyth (2005) introdujeron un nuevo

---

22 Representa la distribución espacial de una magnitud escalar, asociándole un valor a cada punto del espacio. Los campos escalares se usan en Física, por ejemplo, para indicar la distribución de la temperatura o la presión de un gas en el espacio.

concepto: la "inflación cumbre", la cual se produciría mientras la expansión abandona el horizonte, y demuestran que la inflación a partir de un máximo local del potencial es capaz de hacer frente a dos problemas, el ajuste fino de los modelos y de sus condiciones iniciales. También derivaron las limitaciones observacionales de las ondas gravitacionales a detectarse para la próxima generación de experimentos (a excepción de la inflación natural).

- **La Inflación Híbrida:** Introducida por Linde en 1994, se basa en un proceso inflacionario caótico suponiendo dos campos escalares con potenciales efectivo en dos variables. Una de las ventajas de este escenario es la posibilidad de obtener pequeñas densidades de perturbación aún para constantes de acoplamiento grandes.

## Las Fluctuaciones Cuánticas

La estructura del vacío en un universo en expansión exponencial es mucho más complicado que en un universo de Minkowski, ya que las longitudes de onda de todas las fluctuaciones en el vacío del campo escalar crecen también exponencialmente. Cuando ellas se tornan mayores que  $H_0^{-1}$ , las fluctuaciones dejan de oscilar y su amplitud adopta por mucho tiempo un valor fijo no nulo debido al término de fricción que comentamos antes. Debido a que el vacío contiene fluctuaciones en todas las longitudes de onda, la inflación conduce a la creación de cada vez más perturbaciones; son estas perturbaciones las que originarán a la postre las galaxias.

La principal diferencia entre las teorías inflacionarias y la vieja cosmología surge cuando se calcula el tamaño de una región típica al final de la inflación. Aun cuando el tamaño inicial del universo fuera tan pequeño como la longitud del Planck, luego de  $10^{-30}$  s de inflación el mismo adquiere tamaños enormes, como dijimos anteriormente, de tres órdenes de magnitud mayores que el que se observa hoy, resolviendo inmediatamente muchos de los problemas de la vieja teoría cosmológica.

## La Historia Térmica del Universo

### Generalidades

En la mayor parte de la historia térmica del universo, dado que la velocidad en que los fotones y otras partículas han llevado adelante reacciones químicas ha sido mucho mayor que su velocidad de expansión, conlleva a pensar que se alcanzaron procesos de equilibrio térmico en volúmenes muy pequeños lo que implica que no hubo en el mismo un flujo neto de energía. Por lo tanto dicha expansión ocurrió adiabáticamente. Aplicando la primera ley de la Termodinámica, a presión constante, conduce a afirmar que la expansión también se habría llevado a cabo sin variación de la entropía.

De la segunda ley de la Termodinámica sabemos que en todo sistema cerrado la entropía no varía, y como las partículas en un plasma disponen de la máxima entropía cuando se ha alcanzado el equilibrio térmico, la suposición de la expansión adiabática e isoentrópica sería coherente, al menos en la etapa dominada por la radiación. Sin embargo, esta aseveración también sería cierta aún en la época dominada por la materia antes del inicio de la contracción gravitatoria que dieron origen a las galaxias.

En general, el plasma primordial era una mezcla de partículas relativistas y no relativistas a una dada temperatura. Puesto que la densidad de las primeras fueron exponencialmente menor que las últimas, se ignoran aquéllas.

Para hallar una relación entre la temperatura y la edad del universo se parte de la escala de distancias  $a(t) \propto t^{1/2}$  y del parámetro de Hubble  $H_0 = \frac{\dot{a}}{a}$ , lo que conduce a  $t^{-1} \propto \sqrt{g} T^2$ , siendo  $g$  los grados de libertad del sistema (número de partículas multiplicado por los grados de libertad de cada una). Independiente de las leyes de conservación de la energía, la conservación de la entropía implica que la energía está igualmente distribuida entre todos los grados de libertad de tal manera que un cambio en los grados de libertad viene acompañado por cambios en el movimiento aleatorio (y por lo tanto en la temperatura). Luego, a mayor grado de libertad, mayor aleatoriedad en los movimientos (desorden). Cuando un conjunto de partículas solo poseen energía cinética, su entropía es máxima cuando se alcanza el equilibrio térmico. Para un sistema de cuerpos gravitantes, la entropía se incrementa cuando se aglutinan, siendo máxima la entropía cuando se alcanza la condición de agujero negro.

## El Enfriamiento del Plasma

Durante la "Era de la Radiación", cuando la temperatura era del orden de  $10^{11}$  K, todos los electrones y los fotones tenían una energía por debajo del límite de producción de pares protón-antiprotón. Así, el número de protones (también los neutrones y los antinucleones) no aumentó como resultado de las colisiones térmicas y por lo tanto sólo podía disminuir.

Todas las partículas en equilibrio térmico se "termalizan" por los fotones y piones energéticos, apareciendo una fuerte caída a 200 MeV causada por una transición de fase. Por debajo de 200 MeV tenemos materia hadrónica y leptónica, mientras que por encima de 200 MeV, los hadrones se disuelven en sus constituyentes, contribuyendo mucho más a los grados de libertad.

En este momento la densidad del número de nucleones disminuye rápidamente debido a que se han convertido en partículas no relativistas. En consecuencia, tienen una mayor probabilidad de aniquilarse en pares de leptones, de piones y fotones, por lo que su densidad no responde a la distribución de Fermi sino ahora a la de Maxwell-Boltzmann. Como puede verse a partir de esto último, cuando  $kT$  es menor que la energía promedio de las partículas, esta densidad numérica disminuye rápidamente debido al factor exponencial.

Si no hubiera habido exactamente el mismo número de nucleones y antinucleones, no podemos esperar que muchos nucleones pudieran haber formado la materia que hoy conocemos. Entonces, como vivimos en un universo dominado por la materia, debe haber habido originalmente algún exceso de nucleones, ya que los neutrones y los protones existían en igual cantidad.

## ¿Universo en Rotación?

La rotación del universo es de interés histórico, ya que le brindó a Einstein lo que él llamó el *Principio de Mach*, que fue una influencia importante en el desarrollo de la cosmología relativista. Mach había argumentado que el acuerdo entre los marcos de referencia inerciales de Newton y los marcos de referencia fijos respecto a las estrellas (es decir, sin rotación) no podía ser un accidente, sino que indicaría que la materia distante en el universo es responsable de determinar la inercia para la determinación física de los marcos de referencias inerciales. La intención de Einstein en el desarrollo de la gravedad relativista era, en efecto, expresar la idea de que era la gravedad el medio físico por el cual las estrellas determinaban los sistemas de referencia inerciales.

Lamentablemente, las ecuaciones de Einstein permiten cosmologías en las que existe la inercia pero no la gravedad (porque no hay materia) por lo que las ecuaciones fallan completamente en este aspecto. Peor aún, tal vez las ecuaciones permitan la existencia de otros “universos” que contienen materia pero en los que los marcos inerciales locales giran con relación a las estrellas distantes.

Por lo tanto, la Relatividad General falla en proveer una base para el *Principio de Mach* en la forma que Einstein pretendía. El punto de vista actual parece ser que la inflación volvería a ofrecer la solución diluyendo cualquier rotación inicial físicamente razonable durante el período de expansión inflacionaria.

No obstante ello, una estimación aproximada de una velocidad de rotación sería inferior a la medida del corrimiento Doppler de  $600 \text{ km s}^{-1}$  a la distancia de Hubble o, equivalentemente, a una revolución cada  $10^{13}$  años. Pero este valor podría ser mejorado por consideraciones detalladas de la anisotropía de microondas.

## Consideraciones Finales

Todas las teorías físicas son aproximaciones de la realidad y, como tal, pueden fallar si se las lleva más allá de sus hipótesis de trabajos. Las ciencias, en general, avanzan incorporando las teorías que reproducen las experiencias y pueden ser extendidas hacia hipótesis más amplias. El modelo estándar del “Big Bang” tiene el apoyo de numerosas evidencias observacionales, por ello nadie duda de su validez. Sin embargo, en las últimas dos décadas se abrió un panorama más amplio de la inflación cosmológica que lo ha convertido en un probable nuevo modelo estándar cosmológico, de tal manera que ahora todas las cuestiones cosmológicas se formulan contemplando el contexto del paradigma inflacionario, que explica de la mejor manera las observaciones cosmológicas cada vez más precisas...hasta que aparezca la siguiente teoría.

En los próximos años tendremos un conjunto mayor de observaciones de alta calidad que pondrán a prueba la inflación y el paradigma de la materia oscura en la formación de estructuras, determinando con muy buena precisión muchos de los doce o más parámetros de los modelos cosmológicos estándar. Puede parecer que con ello se podría ajustar casi todo, pero éste no es el caso, aún si se dispusiera de suficiente cantidad y calidad de datos. Un ejemplo ilustrativo es el modelo estándar de partículas en Física, con cerca de veintiún parámetros y medidas precisas de aceleradores distribuidos a lo largo de todo el mundo. Este

modelo está siendo rigurosamente probado, midiéndose sus parámetros con una precisión mejor que el 1%.

Está claro que las mediciones de alta precisión convertirán al modelo estándar tan robusto como el de la Física de Partículas. En efecto, los avances tecnológicos de los detectores de física de partícula son los principales responsables de la aparición de nuevos datos de observaciones cosmológicas; pero todavía queda mucho por hacer. Con el advenimiento de mejores experimentos de mayor precisión, la Cosmología se está transformando en una ciencia madura, donde las especulaciones han abierto camino a la fenomenología.

Sin embargo, existen aún muchas preguntas fundamentales sin respuestas. Por ejemplo, aun no sabemos la naturaleza del campo del *inflatón*, ¿existe algún nuevo campo escalar en la simetría electro-débil que rompa la simetría local o es que se debe acudir a una efectiva descripción de interacción a altas energías? Se espera que los futuros experimentos en física de partículas nos brinden las claves para entender su naturaleza.

La inflación tuvo su inspiración en el campo de Higgs, el campo escalar que se supone ser el responsable para las masas de las partículas elementales (quarks y leptones) y de la ruptura de la simetría electro-débil. Tales campos se los están buscando en el Gran Colisionador de Hadrones y nos permitirá a conocer una de los problemas claves en la Física: el origen de las masas. Si los experimentos descubren cosas completamente nuevas e inesperadas, afectarán automáticamente y fundamentalmente a la inflación.

Una de los desafíos más difícil que tiene la nueva Cosmología es el conocimiento del origen de las constantes cosmológicas, si es que se logra confirmarse a través de conjuntos independientes de observaciones.

Desde que Einstein introdujo la manera de contrarrestar la atracción gravitatoria, los cosmólogos y físicos de partículas se animaron a pensar en este nuevo paradigma durante años. Sin embargo, no se dispone hasta el momento de un mecanismo para explicar su extraordinariamente pequeño valor (120 órdenes de magnitud por debajo de lo pronosticado por la Física Cuántica). Durante varias décadas se especuló que este problema puede estar relacionado con la cuantificación de la gravedad. La Teoría de la Relatividad General es una teoría clásica del espacio-tiempo, mientras que la construcción de una Teoría Cuántica de la Gravedad ha sido particularmente difícil de construir, ya que trata cuestiones tan fundamentales como la causalidad y la naturaleza del espacio-tiempo.

El valor de la constante cosmológica predicha por la Física Cuántica tiene que ver con nuestra falta de entendimiento de la gravedad a nivel microscópico. Sin

embargo, su efecto es dominante a escala macroscópica (cúmulos o supercúmulos de galaxias). Esto constituye lo que se conoce en Mecánica Cuántica como una *anomalía*.

Podríamos pensar que, tal vez, la Teoría de la Relatividad General no sea la descripción correcta de la gravitación en las escalas más grandes. De hecho, sólo en los últimos millones de años el universo observable es lo suficientemente grande para que los efectos globales puedan ser notables. Como vimos, en sus inicios era mucho más pequeño de lo que es ahora y, presumiblemente, dicha Teoría brinda una descripción correcta de su evolución, según lo confirmado por los éxitos del modelo estándar. Al expandirse y abarcar regiones cada vez más grandes, las posibles desviaciones de esta Teoría se convertirían en importante. Es muy posible que la reciente determinación de una constante cosmológica (a partir de las observaciones de supernovas con elevados corrimiento al rojo) ayude a dilucidar esta disyuntiva. Si este fuera el caso, deberíamos esperar que la nueva generación de instrumentos que permitan obtener observaciones cosmológicas de altísima precisión no sólo afecte a nuestro modelo cosmológico del universo, sino también a una descripción más fundamental de la misma naturaleza.

Jordi Cepa (2007) propone una interesante valoración del conocimiento actual de la temática cosmológica en términos de un examen académico, la cual nos permitimos resumir aquí.

El universo primordial a alta temperatura recibiría la más alta calificación con honores, ya que explica muy satisfactoriamente la nucleosíntesis primordial y la radiación de fondo de microondas. Asimismo, alcanzaría un sobresaliente el modelo de expansión del universo, con un fuerte basamento dado por la Relatividad General, si bien las evidencias directas son escasas.

La existencia de materia oscura fría no bariónica ameritaría una muy buena calificación, ya que existen muchas evidencias en la cinemática de distintos objetos astronómicos como en las anisotropías encontradas en la radiación de fondo, sirviendo también para la formación de estructuras. No obstante, se torna difícil obtener medidas lo suficientemente precisas para afirmar la constancia de las constantes físicas universales.

La energía oscura, responsable de la expansión acelerada del universo, alcanzaría la mínima calificación para aprobar, ya que faltan mayores evidencias observacionales e independientes.

Finalmente, respecto a la inflación, solo existen evidencias indirectas y la cuestión no está del todo ratificada, por lo que no se dispone actualmente de los elementos necesarios para aprobar y ser parte de un modelo confirmado.

El 4 de julio de 2012, a tres décadas del famoso anuncio del físico italiano Carlo Rubia, el mundo científico miró nuevamente expectante hacia el CERN (esta vez con un colisionador mucho más potente, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) de 7 Tev). Joe Incandela (1962-), físico norteamericano, anunció al mundo el descubrimiento del inextricable bosón; no obstante, queda por resolver si el hallado se corresponde con el Modelo Estándar o abre la puerta a una nueva Física por descubrir, ya que se necesita aún un nuevo acelerador (llamado "fábrica de Higgs") el cual se prevé construir en un futuro próximo, proyecto que necesitaba como punto de partida este hallazgo realizado, el cual abre un paso significativo en la búsqueda de la teoría de la gran unificación, que pretende relacionar tres de las cuatro fuerzas fundamentales conocidas, quedando fuera de ella únicamente la gravedad; además, permitirá explicar por qué la gravedad es tan débil comparada con las otras tres fuerzas.

Junto al bosón de Higgs también podrían producirse otras nuevas partículas cuyas existencias se ha predicho teóricamente, como los *strangelets*<sup>23</sup>, los *micro agujeros negros*<sup>24</sup>, los monopolos magnéticos o las partículas supersimétricas (ver capítulo III).

Físicos y cosmólogos celebraron a lo grande este nuevo día histórico, pero al otro día volvieron a sus escritorios y ordenadores para seguir escarbando los orígenes de nuestro universo.

---

23 Son pequeños fragmentos de la hipotética "materia extraña", la cual constituiría el verdadero estado fundamental de la materia, en donde los núcleos atómicos serían solamente estados "metaestables" de muy larga duración.

24 Agujeros negros predichos por la Mecánica Cuántica, de tamaños tan diminutos (- 10-35 m) que no interactuarían con la materia ordinaria.



## CAPÍTULO V

# Límites y desafíos de la Teoría del “Big Bang”

Lía Celinda Acosta

El lector nos ha acompañado hasta este capítulo sorteando seguramente dificultades y, esperamos, sin perder el interés y la curiosidad que lo llevó a emprender la lectura de este libro. Compartimos con él la fascinación con que dirigimos la mirada al cielo y el viaje que inicia nuestra mente por abstractos mundos de ideas donde ocurren fenómenos que la ciencia modeliza y predice.

Como docentes, con la mente alerta y predispuesta, podemos poner en valor e interpretar, desde nuestros conocimientos sobre el tema, los modelos alternativos que construyen, por ejemplo, los niños. Una niña de ocho años hablaba con su abuela, le contaba lo que había aprendido en la escuela. “¿Sabés que la Tierra se mueve? Y los planetas también se mueven...” Se queda pensando y luego le pregunta a la abuela “¿y las estrellas?, ¿se mueven las estrellas?” La abuela le dice “vos, ¿qué pensás?” La nieta, luego de un momento, responde “no, no se mueven”. La abuela le dice “¿te parece?” La niña, con asombro ante la pregunta, contesta “ino se mueven, porque están pegadas a la noche!”. La respuesta nos recuerda el modo en que procede la construcción del conocimiento científico en el ser humano. Repetimos de algún modo su historia y su evolución según investigaciones de las que se nutre la Didáctica de las Ciencias. Esa noche, esa oscuridad a la que “están pegadas las estrellas” podría ser la esfera de las estrellas fijas de las primeras cosmogonías, mencionadas en el primer capítulo, o podría ser la trama del espacio-tiempo de Einstein, que se aborda en el capítulo tres.

En otra oportunidad, la niña y su abuela compartían una tarde lluviosa. La niña dice “va a llover en la Luna”. Sorpresa enorme en la abuela que pregunta

“¿porqué?”. La respuesta, en tono convincente, no tarda en llegar: “porque la Luna está abajo”. La abuela, quién escribe estas líneas, trata de interpretar el modelo subyacente construido por su nieta que explique esta predicción: la niña imagina que la gravedad no rige para las gotas de lluvia y que como durante el día la luna está por debajo de la Tierra ya que no se la ve, por tanto las gotas de lluvia que no caigan en la superficie terrestre seguirán su camino y podrán caer en la superficie lunar. Es maravilloso constatar la incesante búsqueda del ser humano tratando de explicar los fenómenos de la naturaleza y su capacidad para elaborar respuestas acordes a su cosmovisión. Por otra parte, estas anécdotas relatadas constituyen un llamado de atención para los adultos que hemos encorsetado nuestra imaginación y que podemos proceder dogmáticamente cuando aprendemos y enseñamos ciencias.

Es largo el camino que ha transitado la ciencia, y cuánto tiene aún que transitar. Esa espiral que va describiendo en su andar amplía simultáneamente nuestros conocimientos y la frontera de los mismos.

Se han mencionado ya, en el capítulo anterior, los problemas de los Modelos del Big Bang y las propuestas que buscan dar respuestas o soluciones en un constante ir y venir entre teoría y observación, entre observación y teoría. En el presente capítulo expondremos las características fundamentales de los modelos del Big Bang más recientes dentro del paradigma  $\Lambda$ CDM ( $\Lambda$  es la constante cosmológica, las letras CDM son el acrónimo de las palabras inglesas *cold dark matter*):  $\Lambda$ CDM con lambda atractiva,  $\Lambda$ CDM con lambda repulsiva, Modelo de Concordancia, Modelo MOND (*Modified Newtonian Dynamics*); también, dentro de los modelos de defectos topológicos cósmicos, el de Cuerdas Cósmicas.

A continuación describiremos algunas de las teorías rivales que fueron desarrolladas para explicar de manera alternativa la base observacional principal de los modelos del Big Bang. Finalmente, de los modelos desarrollados a partir de la gravitación cuántica o teoría cuántica de la gravedad: Teoría de Cuerdas, Teoría-M, Cosmología Cuántica de Bucles, etc., consideraremos este último. No se trata de un tipo de palimpsesto actual sino de otros paradigmas que los científicos están desarrollando en base a nuevos y más precisos datos observacionales; a la utilización de sofisticados *experimentos numéricos* posibilitados por potentes computadoras y complejos software; a nuevas teorizaciones.

Esperamos así recorrer parte del escenario de la Cosmología actual, aventurarnos con el lector por el terreno escabroso de las nuevas propuestas que son puestas a consideración en el seno de la comunidad científica.

## Modelos del Big Bang más recientes

Vimos en el capítulo anterior que, hacia 1980, el modelo del Big Bang presentaba serias dificultades que fueron mencionadas como el problema de la causalidad o del horizonte, el problema de la planitud, el problema de la materia oscura y el problema de la formación de galaxias. Recordemos que materia oscura es toda forma de materia que no emite ningún tipo de radiación que podamos detectar, cuya presencia se infiere de sus efectos gravitatorios. A pesar de estos inconvenientes, el modelo predice hechos observables que ninguna otra teoría explica en su totalidad: la recesión de las galaxias, la existencia de la radiación cósmica del fondo de microondas y la temperatura de la misma, y la composición química general del Universo.

La solución a algunos de los problemas fue posibilitada por el trabajo realizado por el físico ruso Yakov Zeldovich (1914-1987), en 1965, que trajo nuevamente a escena la constante cosmológica de Einstein ya no como una hipótesis para obtener un modelo estático, como en la época en que fuera introducida, sino como algo con base física concreta. Consideró que la constante cosmológica podía interpretarse como la energía del vacío. Es la mecánica cuántica la que predice que la ausencia de materia y radiación, el vacío, no implica que no haya nada. El vacío, como se explicó en el capítulo IV, estaría lleno de un mar de partículas y antipartículas "virtuales" y, por lo tanto, lleno de energía. Zeldovich encontró que las ecuaciones que describen la influencia de esta energía son iguales a las ecuaciones de la relatividad general que describen la influencia gravitatoria de una constante cosmológica. Antes, otros científicos habían encontrado expresiones similares.

En 1980, el físico norteamericano Alan Guth (1947- ), basado en esa interpretación dada a la constante cosmológica: energía del vacío repulsiva, y en la física de partículas, propuso una etapa inflacionaria en la expansión del Universo, como se ha expuesto en el capítulo anterior. Con este exitoso modelo pudo resolverse el problema de la causalidad. También se solucionó el de la planitud, prediciendo además un valor para el parámetro omega, la expresión  $\Omega = 1$ .  $\Omega$  es un parámetro cosmológico definido como el cociente entre la densidad de materia-energía real del universo y la densidad de materia-energía crítica.  $\Omega=1$  indica que la geometría del espacio físico es plana y de curvatura nula;  $\Omega>1$ , que es esférica y de curvatura positiva;  $\Omega<1$ , que es hiperbólica y de curvatura negativa. Observaciones actuales indican que omega es muy próximo a la unidad.

Este valor para el parámetro significó que el problema de la materia oscura cobrara relieve, debido a que la materia observada en el Universo no era suficien-

te para que la densidad de materia-energía existente fuera igual a la densidad crítica, es decir, para que  $\Omega$  fuera igual a la unidad. Los modelos que se presentan a continuación, dentro del paradigma  $\Lambda$ CDM, tratan de resolverlo. El problema de la formación de galaxias o de las estructuras ha conducido a la formulación de otra clase de modelos cosmológicos llamados modelos de defectos topológicos cósmicos, de los cuales abordamos el de las Cuerdas Cómicas al final de esta sección.

## Modelo $\Lambda$ CDM con lambda atractiva

La Astronomía, ciencia teórica y observacional, debido a la naturaleza de su objeto de estudio, pudo incorporar a su método la experimentación a partir de la segunda mitad del siglo XX, con el advenimiento de poderosas computadoras y el uso de simuladores que posibilitaron el diseño de experimentos numéricos. Veamos de qué se trata.

La dinámica galáctica estudia el movimiento de las estrellas en una galaxia y de las galaxias entre sí, debido a la interacción gravitatoria. En la década de los '80 se pudo comenzar a simular dichos movimientos. También se diseñaron experimentos numéricos para la materia oscura; ésta podía simularse como partículas que, aunque no visibles, interaccionan gravitacionalmente con el resto de la masa. Comenzó una etapa en la cosmología en la que podían ponerse a prueba distintos modelos de materia oscura y ver si su evolución, mediante la simulación, terminaba en un universo similar al que observamos hoy.

En 1990, con el auxilio de esta nueva técnica, se llegó a un resultado que introduciría cambios en el paradigma cosmológico: si la densidad de masa total (masa conocida más todo tipo masa) fuera tal que  $\Omega = 1$ , el universo debería ser mucho más homogéneo de lo que hoy se observa; por lo tanto, la masa debía ser menor para que se formaran con más facilidad los "grumos" de materia mencionados en el capítulo IV, que darían origen a las estructuras astrofísicas (galaxias, cúmulos de galaxias) que hoy vemos. Se estaba ante un problema.

Recordemos que hasta este momento se consideraba que la materia visible y la materia oscura (estrellas de neutrones, estrellas que nunca entraron en combustión, agujeros negros, etc.) apenas alcanzaba para un  $\Omega = 0,25$ , por lo que se postuló otro tipo de materia llamada materia oscura cosmológica que podía ser no bariónica (no formada por protones y neutrones) que constituía el 75% restante para que el valor del parámetro omega predicho por la teoría inflacionaria fuese la unidad.

¿Cómo se resolvió el problema? Para conciliar  $\Omega = 1$  con los resultados de los experimentos numéricos se recurrió a la constante cosmológica (a la que se llamará lambda:  $\Lambda$ ); no la de Einstein, recuperada por Zeldovich, que era repulsiva para conservar el modelo de universo estacionario, ni la de la inflación que también era repulsiva; sino una constante cosmológica atractiva, como la gravitación.  $\Lambda$  reemplazaba a la materia oscura cosmológica. Se satisface  $\Omega = 1$  considerando que hay dos contribuciones: la materia visible y la oscura aportarían con  $\Omega_m = 0,25$  y la constante cosmológica con  $\Omega_\Lambda = 0,75$ .

Este modelo se conoce como  $\Lambda$ CDM: lambda materia oscura fría (*cold dark matter*) y hacia 1995 era aceptado por la mayoría de los astrónomos. En él, la constante cosmológica  $\Lambda$  es atractiva y el universo en expansión se desacelera.

## Modelo $\Lambda$ CDM con lambda repulsiva

Desde los orígenes de los modelos del Big Bang hasta este momento, quedó establecido que el universo se expande y lo hace con un ritmo cada vez menor porque la atracción gravitatoria frena la expansión. El tipo de geometría del universo y la cantidad de masa-energía que contiene sólo modifican el ritmo al que se frena. En 1998 los cimientos de la cosmología se vieron nuevamente sacudidos debido a que dos equipos de científicos, independientemente uno de otro, publicaron observaciones que permitían deducir que la expansión del universo no se desacelera, por el contrario, se está acelerando. ¿Cómo se arribó a esta conclusión?

Las cefeidas (estrellas supergigantes variables o pulsantes) constituyen fuentes de iluminación de referencia que permiten medir distancias para las galaxias más cercanas. Para las otras, que están a miles de millones de años-luz, no es posible distinguir estrellas individuales, por lo que no se puede medir los brillos de estas estrellas y deben utilizarse otros métodos; por ejemplo, calcular sus distancias a partir de sus velocidades de recesión obtenidas del corrimiento al rojo de sus espectros. Pero estos métodos dependen del modelo cosmológico que se tome como válido, ya que la relación entre la velocidad de recesión y la distancia depende del ritmo de expansión del universo.

Se consideró, entonces, a las supernovas, eventos que están entre los más energéticos conocidos en el cosmos. Una explosión de supernova libera una cantidad tan grande de energía que puede equivaler al brillo de una galaxia completa de millones de estrellas. Buena parte de la energía se transforma en radiación, por lo que su brillo podría detectarse en galaxias muy alejadas y utilizarlas como a

las cefeidas. A partir de la década del '90 fue posible la detección sistemática de las supernovas. Para que constituyan fuentes de iluminación de referencia todas las supernovas deberían brillar igual (como las cefeidas), pero pareciera que hay varios tipos de supernovas, cada uno con su propio brillo. Hay, en particular, un tipo denominado Ia, que pareciera tener un brillo intrínseco constante, en el mismo sentido que las cefeidas. Se cree que las supernovas de este tipo proceden de enanas blancas que, al incorporar gravitatoriamente demasiada masa de su estrella compañera cercana, colapsan en un evento de supernova. El brillo intrínseco constante se debe a que la masa propia más la que pueden incorporar no puede superar un determinado valor; por otra parte, de la cantidad de masa depende la energía liberada en la explosión.

Este hecho fue utilizado por los científicos aludidos. De las mediciones y el análisis de los datos llevadas a cabo en 1998, se deduciría que la expansión es acelerada. Como la gravitación es atractiva, la causa no es algún tipo de masa; pareciera que el universo posee una constante cosmológica repulsiva, como la de Einstein, que explicaría la expansión acelerada. Al año siguiente se acuñó el término energía oscura para esta versión de  $\Lambda$  repulsiva.

El modelo resultante es una versión del anterior,  $\Lambda$ CDM, pero con la constante cosmológica  $\Lambda$  repulsiva y un universo en expansión acelerada.

## El modelo $\Lambda$ CDM con $\Lambda$ repulsiva como un Modelo de Concordancia

Todos los modelos de universos posibles, formulados o no, dependen de los parámetros cosmológicos:  $\Omega_\Lambda$ , que corresponde a la energía oscura o contribución de la constante cosmológica;  $\Omega_m$ , que corresponde a la materia; la curvatura del universo está dada por  $\Omega = \Omega_\Lambda + \Omega_m$ . ¿Dónde ubicamos al universo actual? Para ello debe tenerse en cuenta los datos empíricos.

Las observaciones de la masa total del universo; sumando la materia bariónica, visible y oscura, y la no bariónica; corresponden aproximadamente a  $\Omega_m = 0,25$ . La observación de supernovas lejanas determinaría un universo acelerado. Las mediciones de las fluctuaciones de la radiación de fondo indican un universo plano, consistente con  $\Omega = 1$  (universo plano). Existe un modelo, dentro del paradigma  $\Lambda$ CDM, que satisface las observaciones, y que por eso se llama Modelo de Concordancia, que representa al universo tal como se cree hoy que es. El universo según el Modelo de Concordancia tiene las siguientes características: plano, ya que  $\Omega = 1$  indica curvatura nula; poco masivo, ya que la masa total, conocida más

oscura, sólo contribuye en un cuarto ( $\Omega_m = 0,25$ ) mientras que la energía oscura contribuye con el resto ( $\Omega_\Lambda = 0,75$ ); y acelerado, la energía oscura repulsiva prevalece sobre la gravitación atractiva de la masa.

En el siguiente cuadro se resumen las características principales de los modelos del Big Bang.

Modelo estándar (antes de 1995)		$\Omega = \Omega_m + \Omega_m' = 1$ ; $\Omega_m = 0,25$ donde $m$ es la materia visible y la materia oscura bariónica; $\Omega_m' = 0,75$ donde $m'$ es la materia oscura cosmológica	Universo plano en expansión, desacelerado, masivo
Paradigma	$\Lambda$ CDM con $\Lambda$ atractiva. (1995)	$\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ ; $\Omega_m = 0,25$ donde $m$ es la materia visible y la materia oscura bariónica; $\Omega_\Lambda = 0,75$ donde $\Lambda$ es la constante cosmológica, interpretada como energía del vacío atractiva	Universo plano en expansión, desacelerado, poco masivo
$\Lambda$ CDM	$\Lambda$ CDM con $\Lambda$ repulsiva Modelo de Concordancia (1998)	$\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ ; $\Omega_m = 0,25$ donde $m$ es la materia visible y la materia oscura bariónica; $\Omega_\Lambda = 0,75$ donde $\Lambda$ es la constante cosmológica, interpretada como energía del vacío repulsiva, llamada energía oscura	Universo plano en expansión, acelerado, poco masivo

Tabla 5.1. Paradigma cosmológico actual: modelos del Big Bang. Fuente: elaborado por Lía Celinda Acosta

## Modelo "Modified Newtonian Dynamics" (MOND)

El modelo que sustenta una dinámica newtoniana modificada, llamado MOND, por sus siglas en inglés Modified Newtonian Dynamics, fue propuesto en 1983 por el físico israelí Mordehai Milgrom (1946-). Se basa en que los movimientos anómalos observados que dieron origen a la materia oscura también pueden explicarse si se supone que la ley de gravitación de Newton, bajo ciertas circunstancias, es distinta a la que conocemos.

Explicuemos, antes de continuar con el modelo, las anomalías a las que hemos hecho referencia. Hace varias décadas se pensaba que, al igual que en el sistema solar, las velocidades de las estrellas y demás materia en la periferia galáctica debía decrecer a medida que se alejaban del centro. Se llevaron a cabo las

primeras mediciones en galaxias espirales y el resultado fue que la velocidad se mantenía constante; la discrepancia entre los movimientos predichos y los observados dio origen a la hipótesis de la materia oscura: se interpretó como que había materia no visible (materia oscura) que provocaba los movimientos no esperados observados.

La ley de gravitación de Newton funciona en la Tierra y en el sistema solar, salvo correcciones relativistas. Milgrom propuso que la ley podía ser distinta cuando la aceleración debida a la interacción gravitatoria es muy baja; sería el caso de la aceleración que nuestra galaxia le confiere al Sol. Cuando se realizan los cálculos con el modelo de Milgrom, la modificación introducida predice los movimientos observados sin necesidad de suponer la presencia de materia oscura.

Este modelo sería un Modelo de Concordancia: plano, poco masivo y acelerado. Pero, para conservar  $\Omega_m = 0,25$  se debe aceptar la hipótesis de materia oscura no bariónica que sumada a la visible constituyan el 25%.

¿Qué problemas afronta el MOND? Uno de ellos es que la aceptación del modelo requiere modificar la ley de Newton para aceleraciones gravitatorias bajas; otro es que aún no hay evidencia observacional de la materia oscura no bariónica. Sí hay evidencia sobre la existencia de la materia oscura bariónica, estudios recientes indican que en las galaxias espirales la misma se distribuye en forma de halo esférico y representa el 90% de la masa total de la galaxia.

## Modelos de defectos topológicos cósmicos: cuerdas cósmicas

Veremos ahora un modelo que, como expresamos ya, aborda otros problemas del modelo del Big Bang inflacionario distintos al de la materia oscura y que tiene que ver con la formación de las galaxias: algunos de los parámetros de la teoría estándar deben ser ajustados a valores extremadamente pequeños para que las estructuras astrofísicas generadas y la amplitud de las anisotropías presentes en la radiación de fondo no sobrepasen lo que se observa actualmente.

Se ha formulado otra clase de modelos cosmológicos llamados modelos de defectos topológicos cósmicos; la formación de defectos topológicos fue predicha por el modelo estándar de partículas elementales. Entre estos modelos, el que interpreta que los defectos topológicos dan origen a cuerdas cósmicas y está dentro del Big Bang inflacionario es el más estudiado actualmente. No se trata de las cuerdas fundamentales que la teoría de cuerdas o supercuerdas propone como entidades de base que sustituyen a las partículas elementales.

¿Qué son las cuerdas cósmicas? Son finas líneas de material primordial, con

una enorme densidad de energía, que se desplazan a velocidades relativistas curvando el espacio-tiempo que las rodea. ¿Qué fenómenos astrofísicos pueden explicar las cuerdas cósmicas? Por la densidad de energía extraordinaria que poseen, interactúan gravitacionalmente de modo peculiar, y pueden generar concentraciones de materia para la formación de grandes estructuras astrofísicas; perturbar dichas estructuras generando velocidades de deriva como las que hoy se observan; curvar rayos de luz procedentes de cuásares o galaxias distantes actuando como lentes gravitatorias; perturbar el fondo cósmico de radiación tanto en la época del desacople de la materia no-relativista y la radiación, como durante el viaje de los fotones del fondo cósmico hacia nosotros. Sus movimientos rápidos e interacciones podrían generar ondas gravitatorias, pero aún éstas no han sido detectadas.

Hay modelos que postulan, además, que las cuerdas cósmicas desarrollarían enormes corrientes eléctricas, como si fueran alambres conductores, que podrían explicar la generación de campos magnéticos primordiales a escalas protogalácticas. Cuerdas de más baja energía podrían explicar el origen de la materia oscura y ser generadoras de los rayos cósmicos más energéticos en la actualidad. Se denomina rayos cósmicos a fotones, electrones, protones y núcleos pesados con elevadas energías que provienen del espacio exterior, bombardeando la atmósfera.

Pero, ¿cómo se forman los defectos topológicos? La respuesta está en las teorías de gran unificación, que involucran energías del orden de  $10^{16}$  GeV; energías que corresponden a momentos anteriores a la inflación cósmica, como se mencionó en el capítulo anterior. Las teorías de gran unificación son modelos de física de partículas que proporcionan el marco matemático en el que, con excepción de la gravedad, todas las otras formas de interacción se relacionan en términos de simetría y la "ruptura" de esa simetría dará origen a las leyes físicas y las fuerzas como las conocemos hoy. A medida que el Universo se expandía y se enfriaba, primero la interacción gravitatoria y luego todas las demás conocidas: la interacción fuerte, la débil y la electromagnética, habrían ido adoptando sus propias identidades. Como vimos en el capítulo anterior, en el marco del modelo estándar del Big Bang, la ruptura espontánea de simetrías fundamentales se realiza en forma de transiciones de fase del universo temprano. Una transición de fase es un cambio abrupto en una o más propiedades físicas de un sistema cuando su temperatura varía en forma continua. Como analogía consideremos la transición de fase de agua a hielo: la formación de la estructura cristalina del hielo rompe la simetría que poseía el sistema en la fase líquida, cuando ninguna dirección par-

ticular era privilegiada. En cada transición el espacio tiempo se “orienta”, desde un alto grado de simetría a uno menor, por la presencia de un campo de fuerzas hipotético; los físicos de partículas piensan que este campo es el campo de Higgs, que se extiende por todo el espacio.

El hipotético campo de Higgs, de cuya existencia se buscan pruebas en el Gran Colisionador de Partículas del CERN, como se mencionó en el capítulo precedente, tendría como función dar la masa a las partículas; de forma similar a como las partículas toman energía de los campos gravitatorio o electromagnético. Pero hay una diferencia, la masa tomada del campo de Higgs es masa en reposo, la masa que se mediría en un laboratorio. En cambio la masa tomada de los campos más familiares, en virtud de la ecuación de Einstein  $E = mc^2$ , es masa adquirida por la partícula en virtud del movimiento que posee o de la energía potencial de un campo. Hasta ahora no se tiene idea de qué reglas controlan los incrementos de masa generados por el campo de Higgs o por qué, por ejemplo, el fotón no toma masa de dicho campo.

El campo de Higgs se ve alterado por fluctuaciones cuánticas (en la física cuántica todo fluctúa) y variaciones térmicas por lo que su comportamiento no sería uniforme en el espacio, terminaría orientado de diferentes maneras en distintas regiones del espacio, cuando estas regiones o dominios de orientaciones distintas se pusieron en contacto no encajaron unos con otros suavemente y generaron “defectos”. Los mismos atraparon el estado físico del Universo temprano, un estado enormemente energético. Serían estos defectos del campo de Higgs los responsables de la existencia de las cuerdas cósmicas. Encontrar un bosón de Higgs (el portador de la interacción en el campo de Higgs, así como el fotón es el portador de la interacción electromagnética del campo electromagnético) con el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) tendría, al menos, dos grandes consecuencias: salvar, en principio, el modelo estándar de partículas y al modelo cosmológico estándar con cuerdas cósmicas consideradas como consecuencias de los defectos topológicos cósmicos.

Finalmente, merece comentarse que el físico argentino Juan Maldacena (1968-) aplicó la teoría de las cuerdas sobre agujeros negros y de sus resultados propuso en 1998 una sorprendente equivalencia entre una teoría de cuerdas en un espacio curvado de cinco dimensiones (con geometría anti de Sitter) y una teoría cuántica de campos gauge (campos que exhiben alguna simetría interna abstracta conocida como invariancia de gauge) en cuatro dimensiones. Esta revolucionaria propuesta, conocida como la “correspondencia de Maldacena”, permite describir una teoría gravitacional en términos de una teoría sin gravedad en una

dimensión menor, siendo crucial en la comprensión del comportamiento cuántico de los agujeros negros y por lo tanto de la gravitación cuántica, encontrando también una posible aplicación al estudio del plasma de quarks y gluones obtenido experimentalmente en colisiones de iones pesados.

## Propuestas alternativas para explicar la base observacional de los modelos del Big Bang

Los modelos del Big Bang nacieron como un intento de describir el universo utilizando la teoría de la relatividad general de Einstein y de la adopción de hipótesis tales como la existencia del principio cosmológico, hipótesis que afirma que nuestra ubicación espacial en el Universo no es privilegiada, que para todo observador posible el universo debe resultar isótropo y homogéneo. También proporcionan marcos en los cuales se puede explicar bien la evolución del universo actual desde los momentos primordiales hasta el presente y posibilitan predicciones teóricas que resultaron muy precisas. Como ejemplo, se puede citar las predicciones sobre la abundancia de los elementos en la nucleosíntesis primordial, que coincide con las observadas por métodos astrofísicos si el número de especies de neutrinos es tres; mediante experiencias en aceleradores de partículas se ha encontrado precisamente tres (neutrinos del electrón, muón y tau).

Pero, como toda teoría científica, los modelos del Big Bang son puestos a prueba ante nuevos datos proporcionados por las observaciones astronómicas y que científicos en desacuerdo con la cosmología estándar intentan interpretar desde marcos teóricos distintos o teorías rivales. Sin embargo, estas teorías no son consistentes con toda la evidencia observacional y por ello no logran constituirse en alternativas válidas. Aún así, considerarlas nos será útil para comprender con más profundidad a la teoría hegemónica.

### Cuando se deja de lado la hipótesis de homogeneidad

Expresamos ya que la cosmología relativista debió aceptar el principio cosmológico que postula la homogeneidad y la isotropía del universo. Sobre él se ha construido la teoría y su falsedad haría caer la teoría cosmológica estándar. La isotropía actualmente es una hipótesis confrontada con la observación, ya se ha comprobado el alto grado de la misma en la radiación cósmica del fondo de microondas, como se explicó en el capítulo anterior. La homogeneidad debe conti-

nuar siendo postulada, ya que no es posible ubicarnos en otro punto del universo para comprobar que vemos a nuestro alrededor lo mismo que desde la Tierra; una razón para conservar esta hipótesis es que la ciencia ya nos ha dado pruebas de que no somos observadores privilegiados.

Sabemos que los fotones pueden perder o ganar energía en un campo gravitatorio generando corrimientos al rojo o al azul. Un universo con una adecuada distribución de materia, que genere diferencias espaciales en la energía potencial gravitatoria, podría dar lugar a las observaciones realizadas por Slipher, que condujeron a la formulación de la ley de Hubble y se constituyeron en la base empírica de los modelos del Big Bang. Esta conjetura fue utilizada en 1978 por el físico sudafricano George Ellis (1939-) y colaboradores, en Sudáfrica. Empleando sólo las observaciones astrofísicas y sin el supuesto de homogeneidad; propusieron un modelo de universo espacialmente finito y cerrado, esféricamente simétrico y estático, en particular, sin expansión: en él no hay Big Bang inicial. Lo interesante del modelo es la explicación alternativa que se da al corrimiento de la luz de las galaxias; éste ya no es más debido a una expansión dinámica global del universo, puesto que este universo está estático, sino a la forma en que los fotones pierden energía en un campo gravitacional (como ya varios experimentos lo han comprobado recientemente en el campo gravitatorio de la Tierra): el corrimiento se debe a diferencias espaciales en la energía potencial gravitacional de las regiones por las que viajan los fotones.

¿Cuál es el diseño del universo en este modelo? No es un modelo simple, posee dos centros con nuestra galaxia cerca de uno de ellos. Una representación de este universo luciría como una pelota de rugby, en uno de los extremos estaría la singularidad, en donde las energías y temperaturas crecen sin límites y de donde provendrá el plasma primordial que luego se diferenciará en partículas elementales, formará los núcleos ligeros, luego los átomos y dejará huir el fondo de luz residual que conocemos como la radiación de fondo. En el otro extremo, llamado extremo templado del universo, está nuestra galaxia y el entorno astrofísico que conocemos. Esta posición particular que se nos asigna presenta problemas, Ellis y colaboradores dan respuestas antrópicas; afirman que si queremos que realmente el universo dé origen a la vida como la conocemos, ésta deberá desarrollarse en aquél lugar que le sea más favorable, lejos del calor insoportable de la singularidad.

En este modelo se podían reproducir, cualitativamente, algunas de las observaciones fundamentales de los modelos del Big Bang, empleando la cinemática del modelo, esto es, sabiendo la forma del espacio-tiempo dada por la distribu-

ción de la materia en el universo; pero sin usar las ecuaciones de la relatividad general, que dan la dinámica del espacio-tiempo.

Este modelo fue pronto abandonado porque sus propios autores señalaron los puntos débiles. Una vez que las ecuaciones del campo gravitacional (la dinámica) fueron incorporadas en el modelo, y sin incorporar las hipótesis *ad hoc*, vieron que la relación deducida de las ecuaciones entre el brillo aparente de las galaxias, que da una idea de su distancia, y su corrimiento al rojo, no era compatible con las observaciones de la época.

## Metagalaxia primordial. Materia y antimateria

Los físicos suecos Hann Alfvén (1908-1995) y Oskar Klein (1894-1977), en los años 1960, formularon una teoría alternativa que consideraba la existencia de iguales cantidades de materia que de antimateria en el universo primitivo. Estas dos especies de partículas se aglutinarían para formar una inmensa metagalaxia primordial cuya posterior desintegración daría cuenta de la expansión actual del Universo.

La antimateria es una forma de energía compuesta por antipartículas con propiedades opuestas a las de las partículas ordinarias; todas las partículas tienen su antipartícula, llegando así incluso a formar mundos de antimateria. Cuando la antimateria entra en contacto con la materia se produce una aniquilación mutua y toda la masa de las partículas originales se transforma en enormes cantidades de energía; la energía liberada consiste en fotones altamente energéticos, antes llamados rayos gamma. Este fenómeno se ha verificado innumerables veces en los aceleradores de partículas. Pero si existen materia y antimateria en iguales proporciones, tendríamos que encontrar algún mecanismo para separarlas y evitar, al menos en parte, su aniquilación. Cálculos realizados por el físico francés Roland Omnès (1931-) indicaron que era posible producir, por medio de procesos físicos, la separación necesaria entre estos dos componentes. Alfvén, en 1966, había mencionado la existencia de inmensos muros de plasma y de campos electromagnéticos que separarían estas dos regiones, al menos por un tiempo. De modo que este modelo alternativo parecía viable.

¿Qué propone esta teoría? La metagalaxia primordial, con iguales cantidades de materia y antimateria, colapsaría sobre sí misma debido a la atracción gravitacional, en una implosión enorme. Cuando la densidad en su núcleo fuera lo suficientemente alta, las partículas y antipartículas habrían rebasado sus regiones de confinamiento y se habrían aniquilado, convirtiendo sus masas-energía

en radiación. La presión de la radiación generada habría detenido la implosión y revertido el sentido del movimiento de las partículas, transformando el colapso inicial en una expansión generalizada, como la que se observa con la recesión de las galaxias lejanas. Durante la expansión, un remanente de partículas de materia y antimateria se habría reunido en grupos galácticos diferenciados, dando origen a las galaxias que integran nuestro Universo observable hoy y a las anti-galaxias que aún debemos descubrir.

¿Cuáles son los problemas que enfrenta este modelo, también explosivo? Uno de ellos es que las galaxias estarían rodeadas de materia intergaláctica de baja densidad de la especie contraria, y se producirían continuas aniquilaciones. Estas aniquilaciones no se detectan, a pesar de que los astrónomos observan el cielo desde hace tiempo. Otro sería que a pesar de los mecanismos que separarían a los dos componentes, un eventual traspaso de una región a otra en tiempos recientes. ¿Cómo hacer para que las galaxias y anti-galaxias permanezcan separadas para siempre? El azar podría hacer que galaxias y antigalaxias se encontrasen, o al menos que lo hubieran hecho en el pasado lejano, y entonces deberíamos detectar una fuerte emisión de radiación de alguna parte del cielo, cosa que no sucede. Surgen otros inconvenientes adicionales, ¿cómo explica este modelo la presencia de la radiación cósmica del fondo de microondas, cuál sería su origen? ¿Y su isotropía?

## Otras interpretaciones del corrimiento al rojo

Como se mencionó en el capítulo III, en 1920 Slipher había descubierto que la luz proveniente de la mayoría de las galaxias observadas en su época, llamadas entonces nebulosas extragalácticas, presentaba un corrimiento al rojo en sus espectros, la causa de este fenómeno podía atribuirse al alejamiento de dichos objetos estelares. A mayor velocidad de recesión ( $v$ ), mayor corrimiento al rojo ( $z$ ); siempre que  $v$  fuera mucho menor que la velocidad de la luz ( $c$ ) de acuerdo al efecto Doppler-Fizeau.

Años más tarde, en 1929, Hubble calcula la distancia ( $d$ ) a la que se encuentran varias galaxias, comprueba que las más distantes tienen mayores valores de  $z$ , y formula la ley que lleva su nombre y que puede expresarse con la ecuación  $v = H \cdot d = c \cdot z$ , donde  $H$  es la constante de Hubble. Para valores de  $z$  cercanos y mayores a 1, que implican valores grandes de  $v$ , la relación entre  $d$  y  $z$  no está dada por esta ley y depende del modelo cosmológico que se considere. Esto se entiende recordando que los rayos de luz seguirán diferentes trayectorias en espacios de

diferente curvatura, y que la curvatura depende de la geometría y de la cantidad de masa-energía del Universo.

Con anterioridad, en 1927 Lemaître había demostrado que las soluciones de la relatividad general para la estructura geométrica y evolución del Universo predicen tanto universos en expansión como en contracción. La decisión estaba en manos de las observaciones astronómicas. Lemaître fue el primero en comprender que la recesión de las galaxias y por consiguiente el corrimiento al rojo, se debía a la expansión del universo. Los modelos del Big Bang, que no explican el "Big Bang", sí explican la existencia de un Universo en expansión, que evoluciona de un modo determinado desde la época de Planck,  $10^{-43}$  segundos, hasta nuestros días, según vimos en el capítulo anterior. Consideremos tres propuestas que explican el corrimiento al rojo de distinta manera.

El astrónomo norteamericano Halton Arp (1927-), al llevar a cabo estudios de galaxias peculiares, el análisis de sus datos le condujo a afirmar en 1971 que la interpretación usual del corrimiento al rojo cosmológico como indicador de la distancia no siempre es aplicable.

Como evidencia, Arp presentó varios grupos de objetos (galaxias y quásares) que presentaban  $z$  muy distintos (galaxias con bajo  $z$  y quásares con alto  $z$ ) pero que, según él, se hallaban físicamente asociados mediante puentes luminosos y por lo tanto a la misma distancia de nosotros. En 1998 expresa que la ley de Hubble quedaría invalidada, al menos para estos objetos, ya que esta ley postula que objetos a igual distancia poseen iguales corrimientos al rojo. Pero existen numerosas mediciones precisas que muestran que varios quásares presentan el mismo  $z$  que las galaxias del cúmulo galáctico al que están asociados, por lo que los ejemplos de Arp serían sólo ejemplos peculiares, posiblemente con una explicación local. Por ejemplo, que los quásares de alto  $z$  (y por ende de alta velocidad) no serían estructuras independientes de las galaxias de bajo  $z$  y baja velocidad, sino que se hallarían en proceso de ser eyectados del núcleo galáctico en el que nacieron. Por otra parte, múltiples intentos observacionales no han confirmado la existencia de los puentes luminosos.

El astrónomo norteamericano William Tifft (1932- ) también ha propuesto explicaciones alternativas al corrimiento al rojo cosmológico; en un trabajo de 1980 afirma que la distribución de las "diferencias" de las velocidades de recesión o del corrimiento al rojo entre las galaxias binarias (sistemas de pares de galaxias) por él estudiadas, parecía ser periódica y favorecer múltiplos de una cierta cantidad arbitraria. La diferencia promedio entre las velocidades de recesión de las componentes del par era nada menos que un múltiplo de 72 km/s, valor actual del

parámetro de Hubble para una galaxia distante 1 Mpc. En la interpretación estándar, las diferencias de  $z$  se deben a los movimientos orbitales de las dos galaxias y no es posible ninguna periodicidad. Cabe preguntarse por qué existiría una regla de cuantización como la propuesta por Tifft y por qué justamente con ese valor. Sobre ella Tifft responde que es el resultado de una propiedad aún desconocida de la materia y/o de las galaxias, relacionada con la existencia de estados cuantizados o discretos de la materia. Estas hipótesis aún esperan ser contrastadas.

Una versión más reciente propone que varios quásares, detectados cerca de galaxias, deberían mostrar una periodicidad particular en sus corrimientos al rojo con respecto a la galaxia. Las razones físicas de este fenómeno no son aceptadas por la mayoría de los astrónomos, pero esta hipótesis ha sido puesta recientemente a prueba gracias a los avances en los censos astrofísicos, tal como el 2dF, para el cual se analizaron y condensaron en 2002 más de mil seiscientas parejas de galaxia-quásar en busca de las correlaciones propuestas. Los resultados concluyen que, dentro de las incertezas propias de todo análisis estadístico de este tipo, no existen evidencias de la existencia de cuantización o periodicidad en la distribución de  $z$  de dichos quásares. El debate aún continúa ya que no todos están de acuerdo con los resultados obtenidos.

### Modelos de la luz cansada

El astrónomo suizo (de origen búlgaro) Fritz Zwicky (1898-1974), quien propusiera la existencia de materia oscura en 1933, analizó en un artículo de 1929 la posibilidad de que existieran ciertas “interacciones gravitacionales” que harían que los fotones perdiesen energía, disminuyendo su frecuencia a una tasa constante, acorde a la evidencia observacional. Estas ideas no parecían descabelladas para la época. Hubble, en colaboración con el matemático y físico norteamericano Richard Tolman (1881-1948), escribieron un trabajo en 1935 sobre distintos métodos observacionales para investigar la naturaleza de los corrimientos al rojo de las nebulosas (galaxias), expresando que les pareció conveniente mantener la mente abierta con respecto a la verdadera causa de los corrimientos al rojo de las nebulosas. Esta reserva muestra las dudas del propio Hubble al respecto.

Una propuesta, que retoma la idea de Zwicky, es la llamada “de la luz cansada”, denominación que nos retrotrae al animismo pero que resulta muy expresiva. Significa que los cuantos de luz perderían energía durante su largo viaje desde las fuentes emisoras hasta nuestros detectores, pérdida que se observaría como aumento en la longitud de onda, tanto mayor cuanto mayor fuese la distancia

recorrida. ¿Qué tipo de mecanismo, excluyendo la expansión del Universo, podría lograr ese efecto?

El astrofísico norteamericano William D. MacMillan (1871-1948), a mediados de la década de 1920, propuso por primera vez un modelo para hacer que la luz de las estrellas "se cansara": la energía radiante de las estrellas nos llegaría modificada porque los fotones serían parcialmente absorbidos por el éter que (entonces se creía) inundaba el universo. Esa energía "desaparece en la fina estructura del espacio y reaparece en la estructura del átomo". Los átomos se evaporarían luego devolviendo al espacio la energía que los había generado, pero este proceso no afectaría el aspecto global del universo, éste se mantendría inmutable e igual a sí mismo. Esta afirmación última es precursora de los modelos de universo estacionario, que abordaremos más adelante.

En la actualidad hay evidencia empírica en contra del modelo de la luz cansada. Sabemos que la teoría de la relatividad predice la dilatación del tiempo. En los modelos cosmológicos de Friedmann-Lemaître, debido a la expansión, los tiempos característicos de los procesos astrofísicos parecen dilatarse, vistos desde la Tierra. Esta predicción se vio confirmada por análisis detallados de más de medio centenar de supernovas, evento que presenta altos corrimiento al rojo; la "curvas de luz" de las supernovas, que caracterizan el súbito aumento y lenta disminución de la luminosidad de estos poderosos colapsos estelares, muestran su "ancho temporal" amplificado o dilatado. Por el contrario, los modelos de la luz cansada no predicen la existencia de la expansión, por lo que son inconsistentes con la dilatación de tiempos detectada.

Otro problema para los modelos de la luz cansada es el que tiene que ver con la radiación de fondo, ésta debería sufrir la misma fatiga por lo que su espectro no tendría por qué mostrarse tan próximo a un espectro térmico o de cuerpo negro. Las distorsiones o apartamientos a esta ley fueron constantemente buscadas. El experimento FIRAS (Espectrofotómetro Absoluto para el Infrarrojo Lejano) a bordo del satélite COBE y más recientemente las mediciones realizadas por la misión WMAP ratificaron el espectro térmico de la radiación cósmica de fondo con una altísima precisión.

En general, los modelos de la luz cansada descartan la posibilidad de una época primordial con altas temperaturas y densidades, tal como lo proponen los modelos del Big Bang. Si éste fuera el caso, es casi imposible explicar la existencia de la radiación cósmica del fondo de microondas y la nucleosíntesis primordial. Por el momento, los modelos del Big Bang prevalecen sobre sus rivales.

## Modelo del estado estacionario

Recordamos, al iniciar esta sección, que los modelos del Big Bang surgen como una consecuencia natural de la aplicación del principio cosmológico. Si era posible concebir un universo igual en todas partes (homogéneo) y en todas direcciones (isótropo) ¿porqué no extender estas hipótesis también al tiempo? Un universo así sería semejante a sí mismo tanto en el espacio como en el tiempo y se verificaría un principio cosmológico perfecto. Sería un universo estacionario, que no quiere decir estático, como el propuesto por Einstein en sus primeros trabajos cosmológicos y que las observaciones de Slipher y de Hubble descartaron. Sería un universo en expansión, pero lo que vemos hoy lo hubiera visto un observador hipotético hace miles de millones de años.

Este modelo se opone claramente a la idea de evolución que sustentan los modelos del Big Bang, en los que el pasado se distingue del presente; en él el universo no tiene ni principio ni fin. Fue propuesto, en 1948, por el físico y matemático británico (de origen austríaco) Hermann Bondi (1919-2005) y el astrofísico austríaco Thomas Gold (1920-2004), y en forma casi simultánea por el matemático y astrofísico inglés Fred Hoyle (1915-2001). Uno de los objetivos fue explicar la edad del universo ( $H_0^{-1}$ ) debido a que las primeras estimaciones de  $H_0$  resultaron excesivamente grandes, obteniéndose un valor demasiado pequeño para la edad, de no más de dos mil millones de años. Ya entonces, empleando medidas de los elementos radiactivos, se sabía que nuestro planeta tenía al menos el doble de edad. Esta inconsistencia restó credibilidad a los modelos del Big Bang.

¿Cómo compatibilizar la expansión cosmológica con el principio cosmológico perfecto? Bondi, Gold y Hoyle propusieron que debía existir un mecanismo de creación continua de materia para que el número promedio de galaxias por unidad de volumen permanezca constante; como no existe el problema de la singularidad inicial de los modelos del Big Bang, la singularidad se traslada al mecanismo de creación continua de la materia; ésta es una hipótesis *ad hoc* que se incorpora al modelo y no el resultado de observaciones astrofísicas.

¿Con qué problemas se enfrenta el modelo del universo estacionario? La densidad de materia-energía actual es cercana a la densidad crítica (1 átomo de hidrógeno por metro cúbico). Para que el universo permanezca siempre idéntico a sí mismo, la tasa de creación de la nueva materia sería de unos pocos átomos de hidrógeno por  $m^3$  cada aproximadamente diez mil millones de años; esta tasa de creación es tan pequeña que es casi imposible medirla. El modelo no explica en qué lugar del espacio aparece la nueva materia, pero existen eventos muy

energéticos y sin explicación satisfactoria en núcleos de galaxias y quásares que podrían albergar el proceso continuo de creación de materia. Tampoco explica en qué forma aparece la nueva materia.

¿Hay evidencias observacionales para este modelo? En la década del '60 se descubrieron potentes fuentes astrofísicas de ondas de radio, como radio-galaxias y quásares del cosmos distante. La luz de los quásares atraviesa gran parte del universo observable para llegar a nosotros, la observación de sus corrimientos al rojo permitió conocer la edad aproximada de los mismos y realizar estudios estadísticos que mostraron que la población de quásares no se mantuvo invariante a través del tiempo. La actividad de estas fuentes mostró un pico de actividad cuando el universo tenía un par de miles de millones de años de vida, indicando una evolución del universo, lo que socavaba los fundamentos teóricos del modelo. El golpe de gracia, al igual que para otros modelos, fue el descubrimiento de la radiación cósmica del fondo de microondas, pues no podía explicar la necesidad de una época remota en la que todos los constituyentes del universo se habrían hallado en equilibrio térmico, lo que evidenciaba que pudieron existir épocas diferentes a la actual; tampoco podía explicar la propia existencia de la radiación y su isotropía.

## El modelo cuasi-estacionario

Una reciente variante es la teoría del estado cuasi-estacionario propuesta en 1990 por Hoyle en colaboración con el astrofísico inglés Geoffrey Burbidge (1925-2010) y el astrofísico indú Jayant Narlikar (1938- ). Se incorpora la posibilidad de que el universo pase en forma oscilatoria por épocas de mayor y menor actividad de creación de materia, dinámica que podría explicar las observaciones de quásares ya mencionadas; las oscilaciones serían el producto de ondulaciones suaves del espacio tiempo alrededor de un estado de expansión estacionario, sin nunca alcanzar una situación singular de energía y temperatura infinitas. La teoría propone un mecanismo para la nucleosíntesis primordial, afirmando que la misma se realizada en las galaxias. A su vez, la energía liberada en la fusión cuando se convierte el hidrógeno en elementos más pesados, debidamente termalizada (es decir, que la temperatura varió de manera que fuera la misma en todas partes), daría origen a la radiación de fondo. En cuanto a la termalización o uniformización de la temperatura, los mecanismos propuestos no son verosímiles. El modelo no logra explicar la presencia de fluctuaciones en la temperatura efectiva de la radiación de fondo, tampoco el pequeño nivel de polarización de la misma descubierta a fines de 2002 y ratificadas por WMAP.

## A modo de resumen

Para terminar con la presentación de algunas propuestas alternativas para explicar la base observacional de los modelos del Big Bang, cabe tener presente que la capacidad actual de observaciones más refinadas pone cada vez más límites a la especulación teórica. Muchos modelos que años atrás parecían viables debieron desecharse ante nuevas y mejores observaciones. Pero esto conlleva la posibilidad de someter a los modelos del Big Bang a pruebas cada vez más cuidadosas, las cuales proporcionen evidencias para convencernos que estos modelos cosmológicos constituyen una buena aproximación de la realidad.

A continuación presentamos un cuadro comparativo de dichos modelos:

Modelo/ Autor(es)	Características principales	Explica	Inconsistencias
George Ellis y colab. (1978)	Sin la hipótesis de homogeneidad. Distribución no homogénea de la energía potencial gravitatoria. Espacialmente finito y cerrado, estático; sin expansión. Singularidad inicial de alta temperatura. Principio antrópico	Corrimiento al rojo cosmológico de la luz de las galaxias, por la inhomogeneidad del campo gravitatorio. Nucleosíntesis primordial y radiación cósmica del fondo de microondas, por la singularidad.	La distancia a las galaxias predicha no es consistente con las observadas
Metagalaxia primordial. Alfvén y O. Klein (1960)	Metagalaxia primordial con materia y antimateria. Implosión gravitatoria revertida, por presión de radiación, en una expansión.	Corrimiento al rojo cosmológico debido a la recesión de las galaxias lejanas. Existencia y distribución de las estructuras astrofísicas observadas	No explica el origen ni la isotropía de la radiación cósmica del fondo de microondas (radiación de fondo). Galaxias de antimateria predichas aún no se observan.
Halton Arp (década de 1960)	Invalida la ley de Hubble: la interpretación del corrimiento al rojo cosmológico $z$ como indicador de la distancia no siempre es aplicable.	Corrimiento al rojo cosmológico: los cuásares de alto $z$ y alta $v$ no serían estructuras independientes de las galaxias de bajo $z$ y baja $v$ , sino que se hallarían en proceso de ser eyectados de la galaxia en la que nacieron.	No se observan los puentes luminosos entre galaxias y cuásares de distinto $z$ predichos

W. G. Tifft (1980)	El corrimiento al rojo cosmológico se debe a una propiedad desconocida de la materia.	Corrimiento al rojo cosmológico.	Sin evidencias observacionales
Luz cansada. W. D. Millan (década de 1920)	El corrimiento al rojo cosmológico se debe a pérdida de energía de los fotones de la radiación que nos llega de los astros (Zwicky). Universo inmutable e igual a sí mismo; no expansivo. No hay una época primordial con altas temperaturas y densidades.	Corrimiento al rojo cosmológico.	La dilatación del tiempo, predicha por la relatividad, confirmada observacionalmente en las curvas de luz de las supernovas, no es predicha. No explica el espectro de cuerpo negro de la radiación de fondo ni la nucleosíntesis primordial.
Del estado estacionario. Autores: Bondi y Gold; casi simultáneamente por Hoyle (1948)	Principio cosmológico perfecto: universo inmutable en el espacio y en el tiempo; que no evoluciona. Universo en expansión, con creación continua de materia. No hay singularidad.	La creación continua de materia para garantizar la inmutabilidad.	No explica dónde se genera la nueva materia ni cómo; la existencia e isotropía de la radiación de fondo. Evidencia observacional en contra: población de cuásares variable en el tiempo.
Del estado cuasi-estacionario. Hoyle, Burbidge y Narlikar. (1990)	El universo pasa en forma oscilatoria por épocas de mayor y menor actividad de creación de materia, las oscilaciones serían el producto de ondulaciones suaves del espacio tiempo alrededor de un estado de expansión estacionario.	La nucleosíntesis primordial, el origen de la radiación de fondo. La variabilidad de la población de cuásares observada.	Mecanismos de termalización de la radiación de fondo no verosímiles. No explica las fluctuaciones y la polarización de la radiación de fondo.

Tabla 5. 2. Propuestas alternativas para explicar la base observacional de los modelos del Big Bang. Fuente: elaborado por Lía Celinda Acosta

## Cosmología Cuántica de Bucles

### La singularidad. Necesidad de una nueva teoría

Sabemos ya, por lo desarrollado en capítulos anteriores, que la teoría marco del Big Bang es la teoría general de la relatividad. Las ecuaciones de Einstein indican que la forma del espacio-tiempo cambiará infinitamente cuando el volumen

ocupado por la materia-energía tiende a cero. El tejido del espacio tiempo se desgarró en una singularidad, lo que significa que las ecuaciones quedan ya no pueden utilizarse. Las nuevas teorías de Hawking, Penrose y otros mostraron que los límites del espacio tiempo en la teoría de la relatividad general no son evitables. La gravedad tiene el timón del espacio-tiempo porque la estructura depende de la materia y no ofrece posibilidad de detener el colapso total mediante, por ejemplo, fuerzas antagonistas. Para tratar de eliminar el problema se necesita una ampliación de la teoría que conduzca a una más global que explique las singularidades de la teoría anterior. Sólo entonces se podrá comprobar si los límites que existen en el caso de los agujeros negros o en el del Big Bang son realmente límites físicos del espacio-tiempo o sólo límites de la descripción teórica.

La teoría cuántica constituye el segundo pilar sobre el que se ha construido el paradigma actual de la física y posibilita una descripción correcta de la materia. En cosmología, al considerar la naturaleza cuántica de la materia de las estrellas, se producen nuevas situaciones estables, como son las enanas blancas y las estrellas de neutrones, debidas a fuerzas antagonistas que se oponen a la atracción gravitatoria, que lleva al colapso de las mismas. Pero en algunos casos, cuando se trata de grandes masas como en el caso de los agujeros negros y de la etapa ultraprimordial del universo, estas fuerzas antagonistas no son suficientes para contrarrestar la gravitación y pareciera necesario considerar la naturaleza cuántica de la gravitación y la del espacio-tiempo, además de la materia. Surge la necesidad de una teoría cuántica de la gravedad. ¿Qué puede aportarnos la teoría cuántica en vistas a configurar esta teoría cuántica de la gravedad? Respecto al problema del colapso gravitatorio, producto de la inestabilidad de la materia, en la teoría cuántica la estabilidad del átomo se logra mediante la aparición de una fuerza antagónica; respecto al problema de la densidad de energía infinita, en la teoría cuántica la finitud de la radiación térmica del cuerpo negro se obtiene de la cuantización de la radiación.

Cuando se busca formular una teoría cuántica de la gravitación, surgen diferentes propuestas debido a que los fundamentos matemáticos de la teoría general de la relatividad y de la teoría cuántica, como las definiciones de sus conceptos, pueden combinarse de muchas maneras diferentes. Dos de las propuestas son la teoría de cuerdas y la gravitación cuántica de bucles. Éstas describen características del espacio-tiempo mediante objetos unidimensionales, cuerdas fundamentales en un caso y bucles en el otro. Pero son muy diferentes en cuanto a sus conceptos y al significado de los objetos unidimensionales. Las cuerdas producen los constituyentes básicos de la materia (y de los gravitones, partículas portado-

ras de la interacción gravitatoria) al excitarse o vibrar, ya que los distintos modos de vibrar tienen distintas energías o masas. Los bucles construyen todo, incluido el propio espacio-tiempo. En lo que sigue se tratará de presentar los fundamentos teóricos de la gravitación cuántica de bucles.

## Gravitación cuántica de bucles

La gravitación cuántica de bucles aplica la teoría cuántica al espacio, al tiempo y a su complicada interacción mutua; no solo puede investigar las perturbaciones en un espacio-tiempo dado sino su propia evolución temporal. Considera que el espacio tiene las tres dimensiones que percibimos, renuncia a la unificación de todas las fuerzas, toma a la gravitación como la más importante.

Combina los conceptos fundamentales de la teoría general de la relatividad y de la teoría cuántica: el espacio-tiempo y la función de onda; para describir la interacción entre el espacio y el tiempo formula una "función de onda de las distancias". No sólo son difusas las posiciones y velocidades de las partículas sino que también fluctúan las dimensiones geométricas del escenario en que se mueven las mismas. En cosmología ese escenario es el universo, cuyo volumen está sometido también a la falta de precisión y nitidez propia de la teoría cuántica para la materia. El universo se expande de manera aparentemente uniforme en el tiempo, pero el cambio no es continuo sino por saltos cuánticos cuyas dimensiones son del orden de la longitud de Planck,  $10^{-35}$  m.

El físico italiano Carlo Rovelli (1956- ) y el físico norteamericano Lee Smolin (1955- ), en colaboración con el físico indú Abhay Ashtekar (1949- ), formularon en 1988 la primera versión de la gravitación cuántica de bucles. Los bucles son como átomos de espacio que dotan al mismo de elementos geométricos tales como longitudes, áreas planas y volúmenes. La imagen del espacio-tiempo de Einstein era la de un paño continuo flexible, en cambio en esta teoría es una trama construida o tejida con hilos, es decir, discreta. Los bucles forman el espacio y donde no hay bucles no hay nada. Se puede pensar que el espacio se constituye al introducir los bucles de uno a uno. Así como la teoría general de la relatividad describe la expansión del universo en el espacio-tiempo como solución de las ecuaciones de Einstein, en la gravitación cuántica de bucles hay ecuaciones de naturaleza discreta que describen la aparición y desaparición dinámica de los bucles. Partiendo de una configuración inicial y de la función de onda correspondiente a dicha configuración, se establece la evolución a lo largo del tiempo mediante sucesivas aportaciones o retiradas de bucles. Se podría comprender al universo en

un estado en el que no habría bucles, como en la singularidad del Big Bang. O quizá las ecuaciones de la gravitación cuántica de bucles presenten diferencias con respecto a las de la teoría general de la relatividad para las densidades de energía extremadamente elevadas del universo primigenio, tales que eviten el estado de desaparición del volumen, y con ello las singularidades.

## Fundamentos teóricos de la cosmología cuántica de bucles

Un gran espacio como el del universo actual contendría innumerables bucles, ya que cada uno de ellos aporta un valor diminuto al volumen total. Los bucles pueden formar intersecciones unos con otros o superponerse, pero aún los que están solos están enredados en forma de ovillo. La imagen de este universo es el de un tejido discreto y no una membrana flexible como en la teoría general de la relatividad. La variación mínima de volumen se da mediante la longitud de Planck por lo que un único salto cuántico es imperceptible en el comportamiento de un gran universo. La estructura de tejido es importante para distancias pequeñas como también para el extremadamente pequeño universo primigenio; como una variación continua del volumen es muy diferente de un salto cuántico, la expansión se produciría de manera totalmente diferente a la de la teoría general de la relatividad.

Para saber si esta teoría llevaba a una singularidad debían resolverse complejas ecuaciones, lo que era posible introduciendo simplificaciones: considerando simetría, homogeneidad e isotropía. La imposición de simetría implicaba que los bucles individuales desaparecían, pero la variación temporal del volumen seguía dándose mediante saltos mínimos.

El físico alemán Martin Bojowald (1973- ) presentó en el año 2000 la formulación simétrica de la cosmología cuántica de bucles. Ésta determina los estados de espacios tridimensionales de distintos tamaños, es decir, funciones de onda que describen la geometría habitual de planos y volúmenes de manera cuántica y fluctuante. Se pone de manifiesto que no todos los tamaños del espacio son posibles, sino solo una cantidad discreta. Para cada valor del volumen hay dos estados, salvo para el volumen que desaparece en la singularidad al que se le atribuye un estado unívoco. La razón por la que aparece esta duplicación es que no sólo el volumen define un estado sino también la orientación. Bojowald encontró la siguiente solución: los volúmenes permitidos pueden considerarse como ubicados en un eje, con valores positivos y negativos, y el cero de la singularidad se encuentra en el centro y no en el borde. En los modelos de Big Bang, la singularidad es un borde.

La cosmología cuántica de bucles introduce un tiempo discreto, al igual que vimos para la expansión, que se produce mediante saltos cuánticos. El tiempo no puede cambiar arbitrariamente, lo hace en múltiplos de un intervalo de tiempo mínimo cuyo valor es un tiempo de Planck, por ello este comportamiento resulta imperceptible. Conlleva una disminución de la cantidad de valores del tiempo pero a la vez el tiempo faltante aparece como tiempo previo al Big Bang: el tiempo no termina en el Big Bang, existiría una prehistoria del universo antes del Big Bang con espacio y tiempo; lo que no se da en la teoría general de la relatividad. La singularidad del Big Bang constituye una frontera del lenguaje en el que había sido formulado, pero no es una frontera del universo.

¿Cómo evita la cosmología cuántica de bucles el colapso del universo? Como en el problema de la estabilidad del átomo, que resuelve la teoría cuántica, la singularidad se evita mediante fuerzas antagonistas que se originan en la atracción gravitatoria clásica. El colapso se frena y luego se invierte el proceso, iniciándose una nueva expansión. Parte de la historia del universo sería así: antes del Big Bang se contraía, al ir colapsándose se hacía cada vez más pequeño y se calentaba cada vez más, entrando en la fase del Big Bang. En esta fase, predominaban los efectos cuánticos y tuvo lugar el frenado y la inversión del proceso, para pasar luego al universo en expansión que contemplamos hoy día. ¿Cuál es la parte que falta de esta historia? ¿Existe una sucesión infinita de Big Bang's y de fases intermedias de universo en expansión y universo que colapsa...?

¿Cómo se evita la singularidad en este modelo? Esto es una consecuencia de la estructura discreta del tiempo. Se puede considerar al tiempo como una rejilla o retícula que puede absorber una cantidad limitada de energía. Según la teoría general de la relatividad, en el Big Bang la densidad de energía debe aumentar sin límites, lo cual es incompatible con la rejilla con capacidad de absorción limitada: debe producirse una repulsión del exceso de energía. Esa energía repelida no puede ir a ningún lugar, por tanto sólo se puede evitar el exceso de energía deteniendo el colapso, es decir, la causa del aumento de energía, e invirtiendo el proceso para dar paso a la expansión. De ese modo se produce la fuerza antagonista que detiene el colapso.

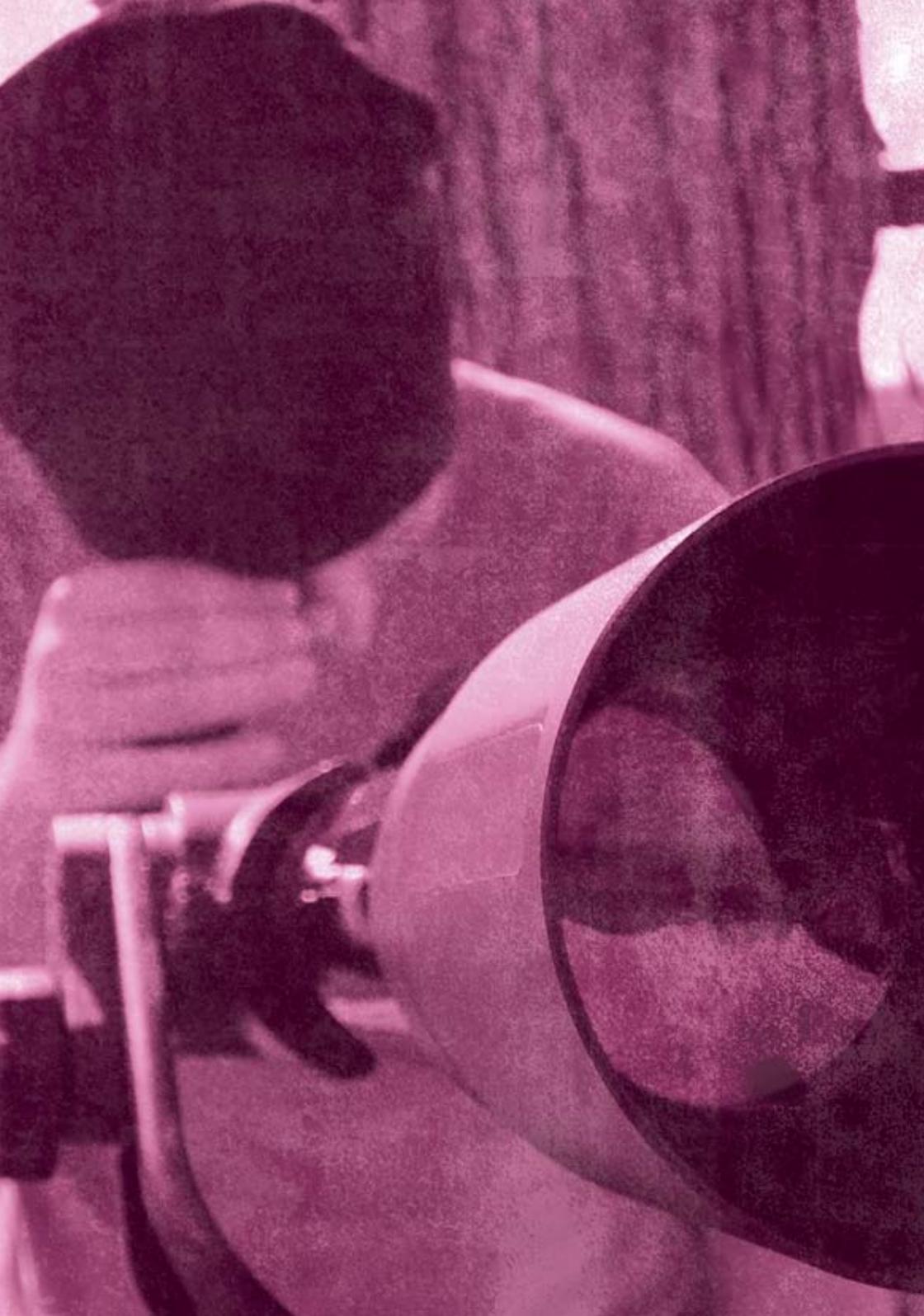
Hay otro mecanismo que detiene el aumento infinito de energía. Al igual que en la fórmula de Planck para la radiación térmica en un cuerpo negro, el ascenso de la energía se detiene a partir de un cierto valor de la longitud de onda y empieza a decrecer. Para longitudes de onda pequeñas, la densidad de energía también lo es y estas longitudes de onda pequeñas se producen en un universo que está colapsándose, su tamaño no permite longitudes de onda mayores.

## Para concluir

Las diversas teorías cosmológicas que han sido descritas de manera sucinta en este capítulo, más allá de que alguno prevalezca o no, pueden servirnos como ejemplo de cómo se construye el conocimiento científico, cómo el ser humano genera modelos que intentan explicar el universo que percibe y el modo en que este intento lo conduce a todo aquello que le es imposible percibir. Ni siquiera su prodigiosa imaginación facilita esta tarea. Recurre a hipótesis de trabajo que posibilitan la formulación del modelo y enmarcan la validez de los mismos. Parte de valores iniciales para encontrar soluciones particulares de las ecuaciones. Cada modelo formulado suele ser de caja negra respecto de sus predecesores, aún cuando fuera translúcido en el momento de ser formulado. Para comunicar esos reinos abstractos, esas predicciones que deduce de complicadas formulaciones matemáticas, entre otros procedimientos, recurre a metáforas y analogías.

Quienes leerán estas líneas no son especialistas en el tema, como tampoco lo es quien las escribe. La motivación para llegar a ustedes con este texto es el deseo de compartir lo que tratamos, con gran esfuerzo, de entender nosotros mismos. El conocimiento es un patrimonio de la humanidad y por ello nos debemos el tratar, en la medida de nuestras posibilidades, de acceder a él.





## CAPÍTULO VI

# *La enseñanza y el aprendizaje del Cosmos*

Lía Celinda Acosta, Daniel Stigliano, Eugenio Valiero,  
David Merlo y Roberto Ferrari

Hemos llegado a esta instancia y quisiéramos que algunos aspectos de la Teoría del Big Bang y la Física del Cosmos hayan sido clarificados. Hemos recorrido un largo trayecto. Contamos en este momento con ciertas conceptualizaciones, en el marco de las teorías aceptadas por la comunidad científica actual, como esbozos de respuestas a los interrogantes que nos interesaba expresar. De todas maneras, somos conscientes de que también habrán quedado planteadas nuevas dudas, y más interrogantes surgidos de la lectura de los capítulos precedentes. ¡Bienvenidas sean!

Retomemos un poco lo que hemos trabajado. Hemos convocado a los antiguos, quienes nos brindaron aportes muy significativos. Debemos tener en cuenta que fueron también ellos, si se considera la Historia de la Humanidad, quienes nos incitaron a la búsqueda de tales respuestas y nos estimularon con sus propias interpelaciones al saber de cada época. Desde entonces hemos avanzado hasta la actualidad en la que nos maravillan los enormes progresos de la teoría cosmológica con sus desarrollos más recientes. Seguramente nos inquieta aún el deseo, al igual que a nuestros antecesores, de conocer “cómo surgió todo”, puesto que es este un requerimiento básico, al parecer, de nuestro “ser en el mundo”, a la vez que constituye un objetivo no del todo alcanzable. Es esta una aspiración humana que nos impulsa, y de la que deviene el motivo de ser de todas las ciencias. Dejamos explicitado que todavía no estamos en condiciones de poder dar respuesta a esa pregunta y no sabemos si algún día llegará ese momento.

Nos gustaría dedicarnos ahora, a una empresa no menos compleja pero que merece un esfuerzo urgente en materia educativa. Quisiéramos poder decir algo acerca de cómo piensa el hombre, y cómo piensa la ciencia. Nos interesa su modo de proceder en función de esos anhelos existenciales. No podríamos desvincularnos de la dimensión metacognitiva ni de los fundamentos epistemológicos de nuestro saber. Es por eso que seguramente acompañan las aseveraciones discursivas del orden científico-académico las valoraciones que hagamos de ellos. No podríamos, en este camino, pasar por alto la discusión acerca de cuál es el estado actual de la ciencia y de los hechos científicos. Una pregunta esencial nos remite al intento de pronunciarnos respecto de cómo sabemos lo que sabemos, cómo se relaciona el ser humano con el conocimiento.

En un terreno más particular, podríamos imaginar que la ciencia no escaparía a los diferentes estados anímicos del hombre. No es trivial cuestionarnos acerca de cuál es el aporte del conocimiento a la felicidad humana, o a su estado de ansiedad, o de frustración. Por ser parte del sistema total de producción cultural de las diferentes etapas de la historia, el saber científico y los paradigmas que lo sustentan podrían correr determinados riesgos, propios de las dificultades de la dinámica de su construcción. ¿Se podrá pensar que la ciencia carga con estados anímicos de angustia, de contextos especiales de producción del conocimiento, de sentimientos y luchas que conforman lugares en los que unas ideas prevalecen por sobre otras en concordancia con la supremacía del poder? A estas reflexiones las debemos tener presentes en la formación docente.

En la primera parte de este capítulo intentaremos destacar las características de los modelos en sus simplificaciones de la realidad que representan. Una dimensión interesante sería la de poner en relevancia cuáles son los peligros pedagógicos de quedar “pegados” a tales modelos confundiéndolos con la realidad y pretendiendo que éstos saturan la explicación del ente modelizado. Hemos utilizado en algunos capítulos analogías tales como las que nos permiten explicar los orbitales atómicos, diferenciamos al Big Bang de una mera explosión mecánica y consideramos, además, las diversas teorías “rivales”. Quisiéramos que este último capítulo contenga además el marco reflexivo que se instituya o constituya en un modo de advertencia acerca de las implicaciones de algunas expresiones tales como “origen del universo”, “expansión”, o el sentido otorgado a la noción de “historia del tiempo”. Explicitamos que aun no existen teorías científicas actuales que expliquen en forma saturada el “punto cero”, o nacimiento del universo. Preferiremos, al hablar de Big Bang, sostener una visión acerca de tiempos primitivos y una imagen evolutiva del mismo, más que la idea de *inicio* puesto que en ese sentido

la ciencia física y la cosmología no pueden pronunciarse. Hasta el momento las teorías tanto de la Relatividad, Cuántica y Gravitatoria, no bastan para dar, ni por separado ni en conjunto, una explicación del “instante cero”.

Se explicarán también diferentes cuestiones referentes a lo que se llama teorías alternativas, teorías ingenuas y modelos de los alumnos, a partir de algunas investigaciones realizadas con niños y jóvenes en clases de astronomía. Considerando que estas teorías se constituyen en obstáculos para aprender, se analizarán algunas estrategias didácticas para provocar el cambio conceptual. Se presentará la construcción histórica del concepto de Cosmología respetando las distintas posturas historiográficas.

Asimismo se sugieren al lector propuestas de indagación, y se propone el análisis reflexivo de una práctica implementada en el aula en una clase de astronomía a la luz del marco teórico desarrollado en los párrafos anteriores. Finalmente, pondremos a consideración una propuesta de enseñanza de las primeras nociones de astronomía utilizando la arqueoastronomía, con un doble objetivo; primero como recurso didáctico y segundo, para poner en valor los conocimientos astronómicos de los pueblos originarios del NOA. Al cerrar así este último capítulo retomamos lo que al inicio del mismo expresamos: hemos avanzado en el conocimiento sobre la evolución del cosmos a pasos agigantados, de un modo no lineal ni uniforme, y los primeros pasos que dio la humanidad en este sentido nos conducen también a algunas de nuestras raíces culturales.

## La realidad modelizada

Si bien no es este un curso de Filosofía de las Ciencias, y por tal motivo no nos corresponderá dar respuesta al total de los cuestionamientos mencionados anteriormente, advertimos la importancia de tenerlos presentes.

Nos interesa referirnos a uno de los asuntos ya aludidos pocas líneas atrás: las incumbencias de concebir un dispositivo que nos permita representar la realidad, un modelo. Nos preguntamos entonces qué es un modelo. Para dar una respuesta sintética diremos en principio que se trata de una abstracción que remite a algo idealizado. Podemos encontrar también un modelo científico en una versión materializada, concreta, que permite operar en y con la realidad. Los modelos expresan ideas contrastables que exponen una o varios aspectos de la naturaleza con el fin de explicar su funcionamiento. Pero no podemos dejar de advertir que estas construcciones intentan asemejarse a la realidad, a una situación particu-

lar, a conceptos y objetos de estudio de las ciencias mediante una “maniobra de reducción” del estado o comportamiento fundamental de dicha situación o cosa.

Como señala Adúriz- Bravo (2008), un modelo presenta al menos dos significados: por un lado, puede referirse a un arquetipo, epítome o ejemplo paradigmático de algo, un caso, una representación, una concreción, o una instancia de representación de una situación dada; por otro, un modelo se referiría a una versión simplificada, una réplica, un esquema o diseño, una imitación o simulación de algo, con captura muy estilizada de elementos centrales y característicos, sin detalles, de lo que se quiere modelizar.

Una concepción más general de lo que significa un modelo nos remitiría a la idea de “representación”. De esta manera, una ecuación matemática sería un modelo, así también una maqueta como referencia para la construcción de un edificio, un gráfico estadístico, presuponer esférica la forma de la Tierra, nuestras imágenes mentales que nos permiten explicar la circulación sanguínea, las aseveraciones que idealizan el desplazamiento rectilíneo de la luz, las leyes físicas, etc.

Dos significados importantes se asocian a la idea de modelo: el de existencia y el de realidad. Ambos han sido largamente discutidos desde Platón hasta nuestros días. Pero es un debate en el que no quisiéramos profundizar. Los modelos son formas de abordaje de fenómenos cuya propiedad es la de capturar lo esencial de dichos fenómenos. No pueden ser una reproducción completa de ellos sino que están limitados en la posibilidad de una “imitación” de la realidad. En la actividad científica, muchas veces son observadas ciertas “grietas” en estas representaciones que hacen que se establezcan situaciones conflictivas en el ordenamiento del saber por lo que algunos modelos entran en crisis y necesitan ser readequados, y en muchos casos desechados.

Lo importante es que los modelos cumplan ciertos “requisitos” que los validan y les otorgan vigencia.

“Un modelo es satisfactorio si: 1) Es elegante. 2) Contiene pocos elementos arbitrarios o ajustables. 3) Concuere con las observaciones existentes y proporciona una explicación de ellas. 4) Realiza predicciones detalladas sobre observaciones futuras que permitirán refutar o falsear el modelo si no son confirmadas. Por ejemplo, la teoría de Aristóteles según la cual el mundo estaba formado por cuatro elementos, tierra, aire, fuego y agua, y que los objetos actuaban para cumplir su finalidad, era elegante y no contenía elementos ajustables. Pero en la mayoría de los casos no efectuaba predicciones definidas y cuando lo hacía no concordaba con las observaciones”. (Hawking y Mlodinow, 2011: 60 y 61)

Respecto de la elaboración de modelos teóricos Carlos Sabino, sociólogo e historiador argentino, especializado en metodología de la investigación, nos señala que se trata de formulaciones abstractas en el marco de un conjunto de relaciones específicas entre conceptos y observación:

“Por supuesto, casi cualquier observación imaginable requiere conceptos, definiciones y relaciones para poder siquiera expresarse: el lenguaje que utilizamos para describir algo, aun la experiencia más sencilla, ya está cargado de sentido y apunta hacia ciertos modelos básicos que nos permiten comprender lo que percibimos. Pero de allí en adelante, se presenta una labor de reflexión y de sistematización que es imprescindible para lograr captar la realidad con mayor profundidad”, (Sabino, 2006:44).

La creación de un modelo científico, y en nuestro caso la Teoría del Big Bang, un gran conjunto de modelos, no asegura que estos coincidan del todo con lo representado. Nos preguntamos entonces si acaso es esto posible. Señalamos que es una dificultad intrínseca de todo modelo, por definición. No sabremos de la distancia conceptual. En todo caso debemos aceptar que no hay verdades absolutas en ninguno de los campos del conocimiento. Creer que somos poseedores de “la verdad” sin admitir otras posibles, podría resultar no del todo saludable para la ciencia. Como docentes, científicos o divulgadores, tenemos que tener presente que aferrarnos a un solo modo de explicación de las cosas es muy limitante. Actuamos en función de ideologías y en la escuela sería un grave obstáculo para la enseñanza. Así podemos pensar que una ley, un teorema o una función es “el conocimiento”, es la realidad irrefutable, cuando no podemos ver más que eso. Advertimos en ese orden que tal posicionamiento podría ser responsabilidad de la ciencia por haberse presentado frente a la sociedad como fuente (única) de toda verdad y saber. Conocerlo todo, de una vez y para siempre, es también la primera causa que cancela el deseo de continuar aprendiendo. Adherimos a la idea otorgada por el filósofo portorriqueño Rojas Osorio (2001) quien señala que la verdad científica es el consenso de una comunidad que privilegia determinadas posturas y avala un determinado momento del devenir histórico del conocimiento.

Continuemos con nuestro tema de interés. Los Modelos del Big Bang son un aglutinado de hechos que han dado una estructura que debió ser contrastada en diferentes instancias, y que aún hoy sostiene dimensiones fuertemente discutidas. En su doble arista, la teórica y la observacional, ha recorrido un breve trayecto pero no menos exitoso, que data de principios del siglo XX.

El devenir histórico de la Astronomía y la Cosmología presenta una variedad de modelos que han podido explicar determinadas situaciones al ser humano

como se ha podido ver en los capítulos anteriores, que luego se han modificado y han ido cambiando. Esta es una característica destacable. Los modelos se “desarrollan”, son provisorios, en tanto quedan sujetos a modificación. Su estabilidad no es perpetua, definitiva, deben admitir la posibilidad de ser reconfigurados cuando su retórica sea inconsistente comparada con la circunstancias. Uno de ellos es el que tiene que ver con imaginar a la Tierra plana, en principio, y esférica luego. Ambas visiones son formas distintas de “ver a la Tierra” que han estado presentes en la historia humana. (Ver capítulo I).

Lo interesante es que más allá de las apreciaciones acerca de la validez de una respecto de otra, ambas forman parte de un sistema de referencia desde donde brindar explicaciones a distintos asuntos, en contextos históricos para los cuales en su momento fueron funcionales y satisfactorios. Colón no hubiera partido en busca de rutas alternativas para la navegación si hubiera concebido plana a la Tierra.

En los capítulos anteriores han surgido también analogías como formas sustitutivas de entendimiento modelizado. Uno de ellos es el que refiere a los modelos atómicos. En primer lugar diremos que este es un ejemplo suficientemente claro de la “evolución” de los modelos (ver capítulo 3). Es decir, ideas simples que se complejizan y dan enunciados que se articulan hasta lograr cada vez mejores explicaciones. No podríamos decir por ello, que los modelos se van acercando a la verdad, ni que tal verdad irrumpa en el conocer científico. Simplemente se modifican en concordancia con las “lógicas” que proponen y con los fenómenos que intentan describir. Admitimos entonces que, por un lado son incompletos, pero por otro, esa misma cualidad, es la que les infiere el carácter de perfectibles. Siguiendo a Thomas Kuhn diremos que las pequeñas incompatibilidades en el interior de esas lógicas funcionan como momentos críticos que solicitan la inclusión paulatina de nuevos elementos que incrementen el conocimiento, no sin esfuerzos de introducción de esa novedad, por el contrario, la comunidad científica resistió tanto a argumentos como a evidencias experimentales (Kuhn, 2004).

Los científicos y filósofos de nuestro tiempo poseen una visión mucho más modesta del conocimiento científico que a principios del siglo XX: es un saber problemático, siempre expuesto a la crítica y a la refutación, con huellas del sujeto que investiga y de su contexto...”,(Chaparro, 2006:46).

Nos parece pertinente también reflexionar respecto de lo que es modelizar la realidad a través de analogías. Una analogía es una comparación de conceptos, es una argumentación por semejanzas, una transformación figurativa.

Pensemos lo siguiente: los científicos, los escritores, divulgadores de la ciencia, y los docentes, empleamos ciertos artilugios al transmitir. El pensamiento analógico exige procurar de esos artilugios una aproximación al concepto que pretendemos que los estudiantes construyan en el máximo posible. Pero no siempre ocurre, que el número de semejanzas entre el concepto y la analogía sea óptimo. Por el contrario, muchas veces las diferencias son tantas que el ejemplo termina siendo inadecuado para explicar un contenido particular. Podría ser esta una condición del discurso, una limitación de la comunicación humana, y una imperfección inherente a la transmisión. Nuestro desafío, es justamente afrontar esas limitaciones e ir en la búsqueda de la mayor claridad posible. Una vez reconocidas, convendrá hacer explícitas las aclaraciones necesarias, poner en la balanza qué cuestiones son afectadas y la relevancia de lo que se puede perder al transformar una idea que requiere de esas transformaciones.

---

La construcción del modelo de átomo fue objeto de intensos intercambios y discusiones muy ricas entre quienes escribimos este libro. Es un ensayo preliminar de nuestros propios escritos al referirnos al átomo que fuimos mejorando hasta presentar en el capítulo 3 la definición a la que ustedes pueden recurrir. Proponemos reflexionar acerca de las ventajas de presentar de esta manera el concepto, y las limitaciones propias de la analogía.

Recordemos que el modelo atómico actual sostiene que una partícula atómica está formada por un núcleo y una nube extranuclear que actúa como envoltorio. En el núcleo se encuentran partículas aun más pequeñas que se denominan neutrones y protones mientras que en la nube extranuclear se desplazan bajo ciertos principios de la naturaleza un tercer tipo de partículas que se denominan electrones. Si el ojo humano pudiera observar un átomo vería algo así como un enjambre de abejas que se desplazan volando y va cambiando de forma segundo a segundo. Tanto los electrones como los protones son tan pequeños que su masa se considera numéricamente despreciable.

Debido a los inconvenientes que nos produce “idealizar” este modelo del átomo nos gustaría agregar algunas aclaraciones. Frecuentemente imaginamos a la corteza atómica, si nos permitimos llamar a esa región con este nombre, como un “envoltorio”. Pero, en realidad, es una zona en la que es probable que en algún momento se encuentre el electrón que gira alrededor del núcleo. Como entidad material no existe.

Para comprenderlo con mayor claridad podemos usar otra analogía. Imagine-

mos que una persona comienza a moverse a nuestro alrededor y gira en círculos adoptándonos como centro del desplazamiento. Supongamos también que su movimiento fuera tan rápido que no podríamos verlo con nitidez. Tendremos la noción de que se mueve en una zona del espacio que es una superficie cilíndrica, una especie de banda cuya altura es la misma que la de la persona que se traslada, puesto que es el espacio en el que le es posible moverse por sus propias características (no podrá pasar el nivel del suelo hacia abajo, ni moverse suspendida en el aire, por una cuestión de sentido común).

Esa superficie cilíndrica constituiría el conjunto de puntos del espacio que describe su cuerpo. Como no es dado señalar específicamente dónde se encontrará a cada instante nos tendremos que conformar con indicar que posiblemente se localice en dicha banda. La forma que este conjunto define, no integraría el sistema persona-persona. Deberíamos entenderlo como el “rastros” que deja al desplazarse. Además tendríamos que efectuar todas las salvedades por las cuales la analogía se aleja del modelo que deseábamos explicar. Dejamos explicitado que estas explicaciones son tan complejas que muchas veces para expresarlas las simplificamos y entonces se genera una idea errónea, como si el átomo fuera una pelota formada por orbitales concéntricos donde se desplazan los electrones, cuando en realidad serían como superficies de esferas de probabilidad, en algunos casos, y con formas lobulares y demás, en otros.

---

## De las teorías ingenuas al conflicto cognitivo

En el punto anterior, se describió el concepto de “modelo”, su importancia para comprender los fenómenos científicos y las ventajas y desventajas de emplearlos en la enseñanza de la ciencia escolar.

En las aulas, los alumnos, en general, no “creen” fácilmente que las cuestiones científicas que su docente les propone a través de modelos. Una dificultad, es que las personas contamos con teorías personales para fundamentar cualquier fenómeno de la naturaleza que se nos presente. Ante este panorama, la tarea que proponga el profesor será fundamental para que esas teorías personales se transformen en algún momento en teorías científicas.

Una investigación desarrollada en el Departamento de Filosofía e Historia de la Ciencia de la Universidad de Atenas en 1992 por Vosniadou y Brewer, reveló

que si se le pregunta a niños entre seis y diez años por qué existen el día y la noche responden con algunas de estas explicaciones: el Sol se oculta atrás de las nubes o las montañas, el sol se va hacia el espacio, la Luna y el Sol suben y bajan por atrás del horizonte, el Sol y la Luna suben y bajan por detrás del planeta, el Sol y la luna giran alrededor de la Tierra una vez al día, la Tierra y la Luna giran alrededor del Sol una vez al día. Solamente un 20 por ciento de la muestra responde correctamente: la Tierra rota en el sentido oeste/este, el Sol está fijo y la Luna rota alrededor de la Tierra. El 80 por ciento de los niños consultados elaboró una “teoría ingenua o alternativa” como respuesta

¿Por qué se registra este tipo de pensamiento en los alumnos?. Estas teorías, nacidas de la experiencia de vida de las personas, son implícitas, incoherentes, específicas, inductivas, se basan en la causalidad lineal y simple, persiguen la utilidad y se diferencian de las teorías científicas que por el contrario, son explícitas, coherentes, generales, deductivas, se basan en una causalidad múltiple y compleja y persiguen la verdad.

Las teorías implícitas son resistentes al cambio y en general se constituyen en un obstáculo para aprender (Rodríguez Moneo, 1998) cuando bloquean la construcción de aprendizajes. En otras palabras, es muy difícil aceptar la teoría científica cuando mentalmente hemos construido una representación ingenua y creemos fielmente en ella. En este apartado, trataremos de explicar cuáles son las ventajas de diseñar una secuencia didáctica conociendo de antemano cuales son las teorías alternativas de los alumnos que forman el grupo de clase. La enseñanza tradicional se planifica a partir del supuesto que el alumno desconoce totalmente el contenido a enseñar. En consecuencia, se proponen explicaciones y tareas que enfocan el nuevo tema desde “cero”. Por el contrario, la “enseñanza para el cambio conceptual” plantea que toda persona cuenta con una teoría o definición ingenua del tema a enseñar y en lugar de partir desde el “comienzo”, se vale positivamente de las concepciones previas, inacabadas y resistentes al cambio, que enuncian los alumnos.

Vosniadou (2008) explica el modelo de cambio conceptual para la enseñanza de las ciencias desde las siguientes premisas. En general, los alumnos organizan los conceptos adquiridos a través de la experiencia cotidiana a partir de un marco teórico físico ingenuo caracterizado por epistemologías y ontologías que son diferentes a los de la ciencia real. Durante el proceso de aprendizaje, los conocimientos científicos se agregan o adicionan a los conocimientos ingenuos anteriores provocando una fragmentación ya que el aprendizaje científico es mucho más complejo y requiere entonces de una reestructuración de los anteriores. Para

lograr esta meta, se necesitan nuevos mecanismos de adquisición planificados con intencionalidad a través de actividades de clase en las cuales los alumnos se enfrenten a tareas basadas en situaciones problemáticas abiertas y de interés y si el aula lo permite, estimular el trabajo en pequeños grupos de manera tal que los alumnos menos avanzados interactúen con los más avanzados.

En la enseñanza secundaria y superior es posible indagar las teorías alternativas de nuestros estudiantes empleando cuestionarios de opción múltiple o promoviendo debates acerca de un tema. En este último caso, es necesario que el docente asuma un rol de coordinador de la discusión pero evitando intervenir en la misma de modo tal que todas las creencias erróneas queden expuestas durante esta actividad. Otro modo sencillo de relevar las representaciones previas de los jóvenes, consiste en pedirles que escriban individualmente cinco palabras que puedan asociar a un determinado concepto (planeta, estrella, año-luz, galaxia, etc.) y mediante un torbellino de ideas provocar una puesta en común de las respuestas.

Con motivo de instituir la UNESCO al año 2009 como Año Internacional de la Astronomía, la Asociación Argentina de Astronomía organizó ese año en la ciudad de Córdoba un *Workshop* nacional de Difusión y Enseñanza de la Astronomía, cuya publicación de las ponencias y trabajos presentados se encuentran disponibles en [http://www.astronomiaargentina.org.ar/archivos/actas\\_de\\_workshops/wdea.pdf](http://www.astronomiaargentina.org.ar/archivos/actas_de_workshops/wdea.pdf)

En la misma se pueden hallar algunas actividades que por sus características podrían analizarse y discutirse en las aulas de formación docente. Destacamos, a modo de ejemplo para trabajar en los institutos de formación docente, el trabajo de Calderón, Bustos Fierro y Merlo (2009) donde se propone una actividad experimental con escolares en la cual se planifica un trabajo de campo para la determinación de los puntos cardinales con un gnomon y otro artículo en el cual los autores desarrollan interesantes “coordenadas de intersección didáctica”, (Navone, Trumper y otros, 2009).

Queremos enfatizar que un modelo constructivista de enseñanza de las ciencias naturales no puede desconocer que en primer lugar, es necesario delimitar el objeto de conocimiento: ¿tengo claro lo que quiero enseñar? ¿Conozco previamente los obstáculos más comunes? Requiere también que partamos de las concepciones previas de los alumnos: ¿se explicitan? ¿Se confrontan? ¿Se reelaboran? Supone el empleo de criterios de validación: ¿el alumno verifica experimentalmente las hipótesis? Nuestro trabajo exige el planteo de propuestas en el marco de la resolución de problemas e intervenir adecuadamente para facilitar el cambio conceptual y provoca rupturas cognitivas.

## Visiones cosmológicas en el tiempo

Planteamos ahora explorar los diferentes cambios conceptuales que ha experimentado a lo largo de la historia el tiempo la concepción de “Cosmología”. Como todo concepto científico, la construcción del significado insumió un largo proceso en el que tuvo que enfrentarse a diversos cambios de paradigmas.

### Primeras concepciones

Parfraseando a Kant (2005), el cielo estrellado sobre nosotros siempre causó admiración y respeto, a lo que agregamos una continua necesidad de saber y entender mejor esa misteriosa oscuridad salpicada de (¿infinitos?) puntos luminosos.

En el primer capítulo comentamos que en el período del paleolítico superior se utilizaba el tallado de huesos para expresar y registrar reglas de repetición periódica, usándose también el tallado en piedras. Proponemos como alternativa para trabajar en las aulas de la formación docente, investigar la “historia astronómica” precolombina de nuestra región, provincia y de nuestro país.

**Actividad:** *Investigar si existen vestigios de registros primitivos que nos indiquen la descripción de ciertos fenómenos o acontecimientos observados en el cielo de aquellas épocas. Integrar esta descripción con todo lo visto en el capítulo I, y si es posible, establecer diferencias y similitudes. Asimismo, si los hubiera, tratar de determinar o investigar qué conocimientos astronómicos habrían poseído, cuál podría haber sido su cosmovisión y/o concepción de universo que tenían.*

*A partir del material encontrado, proponemos elaborar posibles actividades para el nivel secundario.*

A partir de las observaciones de las configuraciones en el cielo se pudo establecer que algunas se repetían periódicamente. Estos fenómenos repetitivos permitieron, entre otras cosas, regular las distintas y primitivas actividades humanas, tales como la agricultura y la ganadería. Con el paso del tiempo, la necesidad de sistematizar los patrones de la duración de las actividades y la ocurrencia de los distintos tipos de eventos condujo a la construcción del concepto “Tiempo” (Merlo, 2012).

“Espacio” y “Tiempo”, conjugados, distintos pero afines, permitieron establecer sustento y significado a las observaciones sistemáticas, dando paso a un extenso proceso de escrutinio del cielo (presente hasta nuestros días) que posibilitó el esbozo de las primeras teorías cosmológicas. Y sus primeros éxitos fue-

ron notables, si tenemos en cuenta la fecha en que se produjo: la predicción del eclipse solar del año 585 a.C.

La Biblioteca de Alejandría (actualmente Egipto) albergaba las primeras teorías científicas y obras literarias de los albores de la humanidad. Los papiros desarrollaban temas relacionados con lo que ahora rotularíamos como Biología, Física, Ingeniería, Literatura y Matemática. En otras palabras, representaba un polo mundial (y quizás único) del conocimiento de la época.

Por ello resulta oportuno, más en nuestra era actual de la masividad de conocimientos, tomar conciencia de lo que representó en su momento esta gran Biblioteca.

**Actividad:** *Para el aula de la formación, proponemos entonces, investigar qué se sabe actualmente acerca de la Biblioteca de Alejandría. ¿Cómo se disponía y organizaba el material? ¿Qué autores se cree que contribuyeron con sus obras? ¿Existían variadas corrientes de pensamiento? ¿Por qué fue destruida? ¿Existe actualmente una biblioteca equivalente? ¿Qué tipo de actividades y secuencias de contenidos se podrían plantear para trabajar en el nivel secundario?*

Variadas fuentes de información describen a esta mítica Biblioteca, incluso la película española “Ágora” (estrenada en el año 2009) aporta algunos elementos a considerar, pese a algunas interpretaciones erróneas de la historia que la misma manifiesta. Con esta actividad se pretende tomar conciencia lo ésta significó para su tiempo. Como en las actividades anteriores, no debe perderse de vista la perspectiva: hoy, si sabemos buscar, podemos obtener la información que necesitamos a través de Internet, es decir, el conocimiento está distribuido y accesible globalmente. Sería interesante plantear las diferencias con las posturas existentes dos milenios atrás, respecto a la actual “democratización del conocimiento”.

## Geocentrismo

Como desarrollamos en el capítulo I, la herencia aristotélica acompañó durante dos milenios a la humanidad y tuvo a Ptolomeo como un gran referente, con su obra Almagesto donde se describía el movimiento de los planetas apoyándose en las ideas de Hiparco (uno de los más grandes astrónomos de la antigüedad). Por ello elaboró su sistema guiándose por la trayectoria circular y uniforme del movimiento diurno, en el que los astros parecen describir circunferencias en cuyo centro se ubicaba a la Tierra.

Para un entendimiento mejor de este modelo, proponemos la siguiente actividad que nos ayudará a visualizar por qué costó tanto el cambio de paradigma hacia el Heliocentrismo.

**Actividad:** *Planteamos para el aula de la formación docente una discusión en la que consideremos válido el modelo geocéntrico. Resulta interesante verificar que si el Sol se moviera alrededor de nuestro planeta en una órbita circular, esta situación resultaría equivalente a otra en la que nuestro planeta lo hiciera alrededor del Sol en una órbita también circular. Resulta oportuno plantear para ello los dos modelos en forma simultánea y analizar las correspondientes proyecciones sobre la esfera celeste. Este resultado nos indicaría que desde el punto de vista de la Cinemática, ambos hipótesis son equivalentes. ¿Ocurriría lo mismo planteando una órbita elíptica? ¿Se puede realizar alguna generalización?*

*¿Qué alternativas se pueden elaborar para las aulas de secundaria? ¿qué obstáculos deben tenerse muy en cuenta en estas propuestas?*

Cuando planteamos a nuestros estudiantes de profesorado estas dos posturas antagónicas: Geocentrismo vs. Heliocentrismo, seguramente obtendremos de ellos algunas muecas displicentes que sugieran considerar absurda a la primera y obvia a la segunda. Es importante motivarlos a adoptar posturas asépticas y descontaminadas de todo los preconceptos actuales que se disponen, viendo y analizando "con ojos del pasado". Además, todo lo que hoy adoptamos como una verdad científica, pueda no serla en el futuro. Preparar a los futuros docentes en ciencias bajo esta visión científica y cambiante de la realidad, producirá sin lugar a dudas mentes con baja inercia a los cambios de paradigmas. Además, esta actividad propuesta permitirá comprender lo difícil que resulta a veces llevar adelante los cambios de paradigma, que particularmente para las dos teorías que estamos confrontando, cristalizara finalmente Nicolás Copérnico con su teoría.

## Heliocentrismo

Todos sabemos lo revolucionarias que fueron las ideas de este astrónomo polaco, sobre todo lo meritorio que significó haber advertido que al observar a los planetas y a las estrellas, se tiene un paisaje celeste donde se entremezclan realidades y apariencias. Esta postura significó haber alcanzado una madurez intelectual admirable, ya que no solamente puso en jaque una discusión cerrada hacía catorce siglos atrás, sino que filosóficamente le quitó a nuestro planeta su lugar de privilegio en el cosmos.

Con la mera observación visual, al planeta Venus no se le podía observar fases ni tampoco se comprendía por qué la Luna giraba alrededor de nuestro planeta y no como todos los otros planetas alrededor del Sol. Esto evidentemente ponía ciertas trabas empíricas a la aceptación de las ideas copernicanas. Recién cuando llegó la revolución tecnológica en la Astronomía de la Edad Moderna: el telescopio y su utilización con fines astronómicos por parte de Galileo Galilei, se abrieron nuevas ventanas para la comprensión y estudio del universo. Al respecto, presentamos en este marco una actividad que propone interpretar las fases de Venus desde los dos paradigmas que estamos trabajando.

**Actividad:** *Las fases venusinas.*

*Proponemos a los estudiantes de profesorado realizar dos esquemas, uno con el modelo de Tolomeo y otro con el de Copérnico, ubicando en cada uno a nuestro planeta y al planeta Venus. Elegir para este último seis posiciones equidistantes en la órbita y, de acuerdo a cada posición relativa al Sol en que se encuentre, dibujar esquemáticamente la fase que predeciría cada modelo. Investigar, luego, cuáles son las fases del planeta Venus y compararlas con las predicciones anteriores. ¿A qué conclusiones se pueden arribar? Resulta propicio buscar en Internet los registros realizados por Galileo y compararlos con los reales.*

*También hubo otras objeciones a la teoría heliocéntrica que serían interesantes conocer como así también cómo las mismas fueron superadas.*

*¿Qué alternativas se pueden trabajar en el nivel medio?*

## **Profundizando la observación del cosmos**

No quedan dudas de que Tycho Brahe fue uno de los más grandes observadores sistemáticos del cielo de la época pre-Galileana. También era un técnico óptico muy avezado ya que él mismo fabricaba su propio instrumental; pero la precisión de sus observaciones no era la suficiente para verificar las predicciones que la teoría copernicana predecía. Allí surgió su rechazo a la misma, proponiendo un sistema mixto conciliador ubicando nuevamente a nuestro planeta en el centro, respecto del cual giraba el Sol y la Luna, mientras que el resto de los planetas lo hacían alrededor del Sol. No obstante este modelo tuvo poca aceptación.

Como comentamos en el primer capítulo, fueron Thomas Digges y luego (de manera independiente) Giordano Bruno los que literalmente ampliaron indefinidamente el tamaño del universo, desterrando el concepto de la esfera celeste fija de estrellas e imaginaron el cosmos plagado de estrellas por doquier. Thomas se valió de las mediciones de la paralaje de la supernova de Tycho de 1572, advirtien-

do su gran lejanía respecto a la Luna, esto es, fuera de la “esfera fija de estrellas”. Con ello, además de ampliar los límites del cosmos, ocasionó más interrogantes.

Pero... ¿realmente tenemos conciencia del significado del concepto “infinito”? Quizás resulte un poco más simple su interpretación y su empleo en un curso de análisis matemático, más como abstracción que como realidad. Sin embargo, las estrellas no son puntos matemáticos distribuidos en una esfera geométrica sino esferas de gas auto-gravitantes cuyas energías producidas en su núcleo nos llega desde todos los rincones de nuestra galaxia.

Plantear la infinitud en la cantidad de las mismas no continúa en la resolución analítica de un límite, sino que debe materializarse todas las noches despejadas de nuestro cielo. Para ello sugerimos la siguiente actividad, en donde la mera observación del cielo nocturno y oscuro salpicado de estrellas no reflejaría una cantidad indiscriminada de cuerpos celestes.

**Actividad:** *Admitiendo una distribución uniforme de estrellas, si el universo es infinito ¿por qué la noche es oscura? El médico y astrónomo alemán Heinrich Olbers (1758-1840) planteó matemáticamente este problema, considerado desde entonces como una paradoja que lleva su nombre, suponiendo una densidad constante de estrellas. Investigar las posibles respuestas que la Teoría del “Big Bang” u otras alternativas brindan a esta paradoja. ¿Se podría deducir con esto la edad del universo? Suponiendo que exista material que absorba en parte esta luz, ¿podría dar explicación a esta paradoja? Ensayar otras posibles explicaciones a esta contradicción.*

*¿Qué actividades se pueden proponer para una secuencia en el nivel secundario?*

## La expansión del universo

Mientras se lo consideraba infinito, nada se decía ni mucho menos considerada la posibilidad de que el tamaño del universo pudiera variar, es decir, tenía el carácter de estático... hasta las observaciones de Edwin Hubble. Como vimos en el capítulo IV, Hubble observó en 1929 que las galaxias más distantes se alejaban de nosotros más rápidamente que las más cercanas; éstas y otras inferencias condujeron luego a la Teoría del “Big Bang”.

La expansión modifica de cierta forma las escalas de distancias con el tiempo. El concepto de espacio-tiempo en expansión constituyó un nuevo paradigma para la ciencia, y representó una nueva etapa en la madurez del pensamiento humano.

Para comprender esta nueva ruptura conceptual, presentamos una actividad que tiene por objeto materializar esta expansión universal, mediante una analogía que nos permita visualizar mejor esta hipótesis.

**Actividad:** *En un universo en expansión ¿existirá algún centro desde donde parecerían alejarse todos los puntos? Pensemos en una banda elástica lineal y ubiquemos objetos a distintas distancias; si la estiramos, ¿qué observaríamos?*

*¿Cómo puede afectar esta expansión a los cuerpos ligados gravitacionalmente? Para responder a esta pregunta imaginemos ahora una pista de baile elástica, en donde haya personas bailando sueltas y otras abrazadas. El “abrazo” representa –en nuestro contexto– un vínculo gravitacional. Si estiramos imaginariamente esa pista en todas direcciones, ¿qué sucedería? Comentar y analizar la situación.*

*¿Cómo se puede acercar este contenido a los alumnos del nivel medio?*

Esta actividad propone apartarnos de la realidad cotidiana que implícitamente supone un espacio-tiempo absoluto y estático, en donde las distancias son siempre constantes e inmutables. Si bien es cierto que los cambios de escala debido a la expansión del universo se ponen en evidencia en estructuras grandes del mismo, resulta oportuno diferenciar dominios en distancias donde perderían validez nuestra concepción local de espacio-tiempo.

Para finalizar el estudio de las visiones cosmológicas a lo largo de la historia proponemos la lectura del siguiente fragmento del texto de Harrison (1991:18-19), el que nos invita a analizar y reflexionar acerca de la simbiosis permanente entre cultura y ciencia, como cada cambio de paradigma no sucede aisladamente, sino que subyace siempre cambios también en la forma de actuar y vivir de las personas protagonistas del mismo. En definitiva, las revoluciones científicas correlacionan en cierta medida con los cambios sociales en donde se producen. En la antigüedad, mitologías y divinidades, en la modernidad, filosofías y corrientes de pensamientos, siempre en continua pugna por regir supremacías ideológicas.

*“La Cosmología y la sociedad están íntimamente relacionadas. Las sociedades crean universos; no solo hacen que esos universos reflejen sus sociedades, pero cada universo controla la historia y el destino de su sociedad.*

*Esta íntima relación es más obvia en las cosmologías primitivas, donde la mitología y la sociedad eran el reflejo de cada una de ellas, y los caminos de los dioses y de las diosas son los caminos de los hombres y de las mujeres. La humanidad crea mitos para ser controlados por los mitos. Personas crueles crean dioses crueles y sus mitos proveen castigos permanentes para las conductas crueles; personas pacíficas crean dioses pacíficos y sus mitos fomentan conductas pacíficas. La interacción entre cosmología y sociedad existe aún hoy, pero frecuentemente en formas más sutiles y menos reconocidas.”*

Este texto nos conduce indefectiblemente a pensar una segunda lectura de nuestro libro con una mirada más social que científica, intentando descifrar algún

palimpsesto oculto en el que subyazca el perfil característico de cada cambio de paradigma.

Asimismo, directamente nos motiva preguntarnos ¿cuáles serían hoy los nuevos “dioses” y las “mitologías” que –como antaño– guían a la humanidad

### **Algunas reflexiones**

Completar este libro, como lo expresamos en la Introducción de este capítulo, significó un gran desafío, uno de ellos, es el de las sugerencias didácticas. En este sentido la propuesta de este apartado consiste en reflexionar, analizar y culminar en la concreción de una práctica de clase para ser analizada en la formación docente que permita enriquecer los recursos disponibles para estudiar aspectos didácticos relacionados a la teoría del Big Bang. Observar el cielo es una de las prácticas más antiguas realizadas por la humanidad. Si bien este aspecto que resulta positivo y que debe aprovecharse en el momento de plantear el estudio de la Astronomía, consideramos que está en el docente de ciencias, el desafío de abordar en la etapa de formación, el estudio que permita dar el salto desde los conocimientos adquiridos en la etapa de aficionado hacia la riqueza académica propia del estudio terciario.

En este apartado pretendemos promover el análisis, por parte del lector, de diferentes aportes de utilidad para encarar el camino a seguir. Entre ellos, el análisis de textos guías como los Diseños Curriculares o programas de estudio de materias afines al tema que permitan orientar en la selección de contenidos a desarrollar, la actividad de campo tanto de observación directa a “ojo” como la de observación con instrumentos, telescopios y binoculares, y las prácticas con el uso de las TIC tanto con simuladores como con programas de computación específicos. De manera que luego de dicho análisis se pueda componer una selección de materiales o herramientas didácticas para aplicar en el aula de una clase de Astronomía.

Por ejemplo podemos recurrir a una listado de preguntas como: ¿cuáles de los temas tratados en este libro se proponen en los programas de estudio?, ¿cuáles de las observaciones pueden ser de utilidad para concretar las experiencias de campo?, ¿cómo poder explicar cuestiones cosmológicas que no permiten experimentación?, ¿Cómo abordar los planteos discutidos en capítulos anteriores sobre la teoría del Big Bang sin poder observar directamente los fenómenos citados?, ¿cómo aproximarnos desde nuestras limitaciones instrumentales hacia un modelo de Universo como el explicado?, ¿Cómo lograr que nuestros alumnos

incorporen entre sus conocimientos teorías como la del Big Bang? Podemos continuar con este desafío y asumir que desde la observación directa, difícilmente, sino imposible, nos resultaría encontrar manifestaciones de un universo en expansión captando el corrimiento al rojo o de señales débiles como la radiación de fondo, que como vimos en el capítulo III formaron parte de la génesis de esta teoría. Sin embargo, otros recursos se encuentran a nuestro alcance, mediante el uso de las nuevas tecnologías podemos aproximarnos a imágenes, trabajar con ellas, construir modelos y facilitar la construcción del conocimiento en nuestros alumnos.

Dentro de estos recursos tecnológicos que podemos implementar en nuestras clases, están los *applets*, programas de simulación, en los que se muestra la evolución de un fenómeno; como también, se reproducen situaciones relacionadas con sistemas físicos. Estos permiten problematizar, intervenir, representar y hasta modelizar un problema determinado.

Lo interesante de la simulación como herramienta es que permite relacionar el comportamiento observacional con el modelo abstracto. La representación de ecuaciones matemáticas en una animación, que es al fin y al cabo una simulación, permite percibir detalles del modelo que no son tan visibles cuando este se expresa en ecuaciones matemáticas (García, 2006).

Cabría plantearnos ¿cuánto tenemos resuelto del desafío de elaborar la práctica de clase con el simple uso de un programa de simulación? Y la respuesta no nos parece difícil, concretamente solo habremos elegido una de las herramientas a utilizar, pero el diseño de la práctica estaría prácticamente “desnudo”.

Con lo expuesto en el párrafo anterior queremos transmitir al lector que en esta instancia, luego de seleccionar el contenido a dictar y la herramienta informática como recurso, debiera elegir las acciones para proponer a sus alumnos.

## La Arqueoastronomía como recurso para la enseñanza de la Astronomía



Figura 6.1  
Sitio arqueológico Rincón Chico, Valle de Yocavil. Estructura denominada “recinto de los ojitos”. Fotografías realizadas por Lía Celinda Acosta



Figura 6.2  
La Ciudadita, en los Nevados del Aconquija. Puerta del Sol en el recinto ceremonial o *aukaipata*. Fotografías realizadas por Lía Celinda Acosta

## Justificación de la propuesta didáctica

La secuencia de actividades que ponemos a consideración del lector lleva por título: ¿Cómo medían el tiempo los pueblos originarios en el Valle de Yocavil (Catamarca) y Nevados del Aconquija (Tucumán)?

Tiene, entre otros contenidos, conceptos y procedimientos básicos de la astronomía: el movimiento aparente del Sol en su desplazamiento anual en la eclíptica, las posiciones extremas de este movimiento cíclico (solsticios), la determinación de la línea meridiana utilizando un gnomon, la construcción de relojes de sol de cuadrante ecuatorial, horizontal y vertical; las correcciones al tiempo observado utilizando la Ecuación del Tiempo (variación por excentricidad y oblicuidad de la órbita terrestre).

Nos situamos en el modelo geocéntrico para considerar un observador, de cualquier época histórica, que se percibe y se piensa en reposo y que mira el movimiento de nuestra estrella en la bóveda celeste, y más aún, el desplazamiento de la salida y puesta del astro en el horizonte que le es familiar. Sabemos que desde la antigüedad el hombre mide el tiempo a partir de la observación y el registro del movimiento cíclico de algunos astros, vestigios arqueoastronómicos dan cuenta de este hecho.

Vamos a adelantarnos a la pregunta del lector. La razón para incluir esta propuesta didáctica en este texto es principalmente porque puede ser muy motivadora para iniciar a nuestros alumnos (y a los del cualquier nivel educativo, con las debidas adaptaciones) en la observación y comprensión de los fenómenos astronómicos. Propuestas similares han sido implementadas en talleres para docentes de profesorado en Física. Puede consultarse en:

[http://www.astronomiaargentina.org.ar/archivos/actas\\_de\\_workshops/wdea.pdf](http://www.astronomiaargentina.org.ar/archivos/actas_de_workshops/wdea.pdf) pp.97-102.

## Introducción

La Arqueoastronomía intenta reconstruir mediante la recuperación de las evidencias plasmadas en construcciones, piedras, cerros, pictografías y objetos diversos, la cosmovisión de un pueblo; es decir, su relación con el cielo y su contenido, a la vez físico (Sol, Luna, estrellas, etc.) y mítico (dioses, leyendas, etc.), así como las aplicaciones prácticas de esta relación celeste en la vida cotidiana: ubicación en el espacio (direcciones) y el tiempo (creación de calendarios civiles y religiosos).

Dentro del paradigma de la Alfabetización Científica y Tecnológica y desde la perspectiva Ciencia, Tecnología y Sociedad, se ha diseñado una propuesta de enseñanza y aprendizaje de la Astronomía para el nivel secundario considerando el aporte de la Arqueoastronomía, ya que brinda, entre otras, la posibilidad de contextualizarla en nuestras raíces socioculturales.

Los vestigios arqueoastronómicos como el Observatorio Solar de Rincón Chico y la *Intihuatana* (amarradero del Sol) de Fuerte Quemado (Reynoso, 2003) en el Valle de Yocavil, hoy Valle de Santa María, provincia de Catamarca; el sitio arqueológico de los Nevados del Aconquija, llamado La Ciudadita (Bravo, 2003), en la provincia de Tucumán, nos interpelaban; estaban allí, a nuestro alcance, al alcance de cualquier observador que para poder interpretar para qué habían sido construidas ciertas estructuras necesita tener algunos conocimientos de Astronomía.

Una primera propuesta didáctica tuvo este referencial teórico, pero fuimos poniéndole un matiz que se dejaba traslucir en el trabajo de la arqueóloga Reynoso, quien expresaba que “las prácticas de observación astronómicas y la elaboración de calendarios de las sociedades bajo estudio aportan nuevas perspectivas para comprender sus complejas relaciones sociales”, lo que parecía requerir un marco más amplio. Pensamos entonces que el análisis de Díaz (2000, p. 78) nos orientaba en la búsqueda: abordar el conocimiento astronómico desde una episteme distinta que pusiera en valor el saber y las prácticas astronómicas de los pueblos originarios, para quienes no fue la razón científica un principio de orden, sino lo mítico-religioso con el objetivo del control político y social.

*La Astronomía Cultural consiste en el estudio de las percepciones humanas del cielo y su relación con la organización de los diferentes aspectos de la vida social, propone que para comprender esas percepciones no podemos interpretar las observaciones del cielo de las sociedades antiguas y no occidentales de acuerdo con pautas occidentales* (Iwaniszewski, 2009, p. 23).

La propuesta didáctica reformulada intenta recoger estas reflexiones e incorpora como estrategia metodológica el concepto de “islotte de racionalidad multidisciplinaria” propuesto por Fourez (1994, p. 69). Cuando abordamos una parcela de la realidad, compleja por naturaleza, distintas disciplinas deben hacer su aporte; construir un islotte de racionalidad significa realizar un recorte en la vastedad de lo multidisciplinario que posibilite construir una representación teórica apropiada a un contexto y a un proyecto que se tiene en perspectiva, que permita comunicarnos y actuar con referencia al mismo.

## Objetivos de la propuesta didáctica

El objetivo general de la propuesta es construir significativamente contenidos de Astronomía de posición, desde un enfoque CTS. Los objetivos específicos son: 1) construir significativamente nociones básicas de la Astronomía de posición; 2) conocer los vestigios arqueoastronómicos del Valle de Yocavil y Nevados del Aconquija para poder considerarlos patrimonio cultural; puesta en valor que propicia la inclusión, la no discriminación, la atención a la diversidad.; 3) discriminar el aporte de las distintas disciplinas que contribuyen al conocimiento de los pueblos originarios y de las relaciones entre ellas, para poder construir un modelo multidisciplinario apropiado para el tratamiento de la problemática planteada; 4) comprender las percepciones que tenían del cielo los pueblos originarios y las que tenemos nosotros como producto de la cultura occidental, para profundizar sus conocimientos sobre la evolución de los modelos cosmológicos ; 5) construir relojes de sol utilizando el conocimiento técnico-científico adquirido y compararlo con el modo en que medían el tiempo los pueblos originarios estudiados.

## Actividades

Se propone a los alumnos del profesorado, organizados en grupos pequeños, desarrollar el proyecto: “¿Cómo medían el tiempo los pueblos originarios en el Valle de Yocavil y Nevados del Aconquija?”.

Las actividades que podrían llevar a cabo son las siguientes:

1. Consulta de bibliografía aportada por el docente y los alumnos sobre Astronomía de posición.
2. Puesta en común de los contenidos estudiados por cada grupo.
3. Visita virtual de los sitios con vestigios arqueoastronómicos y consulta de los artículos de Bravo Orlando (1993) y Reynoso Alejandra (2003).
4. Consulta de bibliografía aportada por el profesor(González, L., Tarragó, M.2004; González, L., Tarragó, M. 2005) y por los mismos alumnos, sobre la historia de los pueblos que dejaron esos vestigios, el conocimiento arqueológico y antropológico sobre los mismos.
5. Establecimiento de relaciones entre los conocimientos astronómicos que están aprendiendo y los que debían poseer los pueblos estudiados, que posibiliten comprender cómo (técnicas) y para qué (prácticas socioculturales) construyeron las estructuras para medir el tiempo: distintos tipos de alineaciones astronómicas e intihuatanas.

6. Elaboración y exposición de un informe grupal que contenga los aspectos que consideren más relevantes sobre los pueblos estudiados, desde la Historia, la Arqueología y la Antropología; y las relaciones establecidas en la actividad 5.
7. Construcción de relojes de sol de cuadrante ecuatorial, horizontal y vertical.
8. Determinación de la línea meridiana utilizando un gnomon.
9. Orientación del reloj utilizando la meridiana y la brújula, determinación de la significatividad del error cometido al utilizar el segundo método. Uso la Ecuación del Tiempo.
10. Organización y concreción, con el docente, de una visita a los sitios con vestigios arqueoastronómicos.
11. En base a la observación de los sitios, diseño de estrategias para la preservación de los mismos.
12. Propuesta de trabajo para la escuela secundaria.

## Desarrollo

Partimos de una problemática: “¿Cómo medían el tiempo los pueblos originarios del Valle de Yocavil? Se intenta poner en valor las raíces socioculturales de los habitantes del NOA a partir de un corrimiento del paradigma occidental, de la racionalidad científica que descalifica todo saber que no responda a sus criterios epistemológicos y ontológicos. Esa puesta en valor atiende a la inclusión, la no discriminación, a la atención a la diversidad. Para lograrlo, se adopta como referencial teórico la Astronomía Cultural, una disciplina incipiente que trata de superar el reduccionismo de la Arqueoastronomía. Cuando nos posicionamos en esta última para analizar el fenómeno del cielo, las dimensiones socioculturales del mismo no son consideradas. Iwaniszewski (2009, p. 24) expresa: “la experiencia del cielo, indisociable de una percepción más o menos clara de todo el medio ambiente que rodea al hombre, también se convierte en el componente esencial de la existencia social”.

Vimos que uno de los objetivos que se propone es que los alumnos conozcan el patrimonio arqueoastronómico y lo valoren como tal. No se pretende de los estudiantes que construyan actitudes preestablecidas por algún consenso social o científico, sino actitudes y percepciones idiosincráticas, aquellas que construye cada individuo como producto de su circunstancia de vida y de los conocimientos que la enseñanza pone en contacto con ellos.

Al respecto, Manassero, Vázquez y Acevedo Díaz (2004, p. 300) expresan: “el concepto de actitud, cuyo componente principal es la valoración afectiva del objeto más que su propio conocimiento, describe mejor el tipo de internalización de una persona ante las cuestiones CTS”.

Intentamos que el aprendizaje de algunos contenidos de la Astronomía de posición sea significativamente construido. Para propiciarlo adoptamos de manera flexible el esquema desarrollado por Aikenhead, mencionado por Teixeira (2003, p. 183): se parte de una problemática social, a continuación se detectan las tecnologías relacionadas con el tema, luego se selecciona el contenido científico (conceptos y procedimientos) a trabajar en función del tema y de las tecnologías relacionadas; en la etapa siguiente se retoman los contenidos tecnológicos y se los analiza con el soporte del contenido estudiado; finalmente se discute la cuestión social y se toma decisiones sobre el asunto, si esto es posible. Este esquema constituye una orientación para el docente que quiera diseñar la secuencia didáctica. Por otra parte, es muy importante que el docente guíe a los alumnos a tomar las decisiones que él mismo tuvo que tomar al diseñar; de este modo los alumnos tienen un rol activo y protagónico que propicia el aprender a aprender.

A continuación vamos a retomar las etapas del proyecto y a fundamentarlas desde el referencial o marco teórico que hemos adoptado:

- 1) y 2) Se pone en contacto al estudiante con los contenidos del conocimiento astronómico que se desea trabajar, con una metodología de consulta previa de material bibliográfico y posterior explicación del profesor, en una secuencia interactiva que le permita al alumno explicitar las concepciones y modelos alternativos que posee, de los cuales ya hemos tratado antes en este capítulo. Se pretende en esta etapa que el estudiante conozca los contenidos; la re-construcción de los mismos e incorporación a su estructura cognoscitiva se logrará en un proceso espiralado a medida que avanza el proyecto, favorecidos por la necesidad de apropiarse de ellos para comprender la problemática.
- 3) El material didáctico construido por el docente, consistente en imágenes de los sitios arqueológicos antes mencionados que poseen estructuras de funcionalidad astronómica, recurre pedagógicamente a la cultura de la imagen de la sociedad actual y a las TIC.
- 4) Se aborda el tema desde algunas de las distintas disciplinas: Historia, Arqueología, Antropología, que con su aporte posibilitan considerar las distintas dimensiones del mismo. Son éstas algunas de las cajas negras (Fourez, 1994, p. 65) que se propone al estudiante abrir para recortar el problema y

contribuir a la construcción del modelo multidisciplinario apropiado al proyecto, el islote de racionalidad multidisciplinario, ya que no hay problema de la realidad que pueda abordarse desde una única disciplina. La complejidad de los mismos amerita, para su comprensión, la convergencia de distintas miradas disciplinares. La enseñanza de las ciencias se lleva a cabo en el modelo tradicional por disciplinas; la enseñanza multidisciplinar de las ciencias es una aproximación con dificultades y a veces se realiza desde una “ideología de la espontaneidad” (Fourez, 1994, p. 86). Las cajas negras que los estudiantes seleccionen para hacer translúcidas dependerán de sus intereses y posibilidades. Con esta actividad se procura el logro del objetivo 3.

- 5) Con esta actividad se propicia la articulación entre Ciencia y Tecnología por una parte, y entre Ciencia y Sociedad, por otra. Los estudiantes van encaminándose hacia la solución del problema planteado en el proyecto y a comprender las percepciones que tenían del cielo los pueblos originarios de la zona y las que tienen ellos como producto de la cultura occidental (objetivo 4). El docente ayuda a los estudiantes a establecer las relaciones aportándoles información sobre los propósitos y alcances de la astronomía cultural. Iwaniszewski (p. 25) expresa: “...aunque el cielo observado desde la Tierra exhibe características comunes y universales, cada sociedad desarrolla su propio modelo de cielo”; “...la astronomía cultural... estudia la realidad social en la cual ciertos objetos y eventos celestes son capaces de condensar valores, conceptos y cosmovisiones que les fueron otorgados por los individuos y los grupos humanos...”. Recordemos que habíamos planteado ya que “las sociedades construyen universos”.
- 6) En esta etapa se objetiva el islote de racionalidad que fueron construyendo. Se favorece la escritura en ciencias, las actividades desarrolladas tienden a que los estudiantes adquieran capacidades propias del científico: realizar consultas bibliográficas pertinentes; hacer análisis, síntesis; recortar el objeto de estudio.
- 7) Con esta actividad se propicia el saber hacer, el uso apropiado y contextualizado del conocimiento técnico y científico que la alfabetización científico-tecnológica propicia.
- 8) En esta actividad realizan un procedimiento técnico/científico. Determinan la línea meridiana utilizando un gnomon, de modo que recrean técnicas utilizadas ancestralmente por el hombre con saberes producto de la observación cotidiana de los fenómenos celestes, que hoy fundamentamos con el conocimiento científico. Se avanza así en el aprendizaje significativo de los

contenidos astronómicos puesto que se requiere comprenderlos para interpretar el sentido del procedimiento y el resultado del mismo.

- 9) La actividad completa los objetivos perseguidos en la actividad anterior e introduce a los estudiantes en la teoría de errores, en los alcances del modelo científico, en la selección del modelo apropiado de acuerdo a las limitaciones de la técnica utilizada. Además, en la adquisición y uso de conocimientos sobre el magnetismo terrestre.
- 10) Además de constituir una experiencia estética sumamente enriquecedora, lo es también porque la teorización construida guía la observación, que de otra manera carecería de significado. Se utiliza el conocimiento científico-tecnológico como instrumento para interpretar la realidad, otro de los objetivos de la A. C. T.
- 11) Se trata de propiciar el compromiso con el medio ambiente natural y sociocultural, la adquisición de actitudes que respondan al enfoque CTS para la formación en ciencias.

Lo que hemos presentado es el resultado del trabajo como docentes e investigadores de nuestras propias prácticas, con el deseo de que puedan servirse en mayor o menor medida otros colegas de todo el país para realizar sus propias propuestas.



## Bibliografía

- Adúriz-Bravo, Agustín. (2008). *Modelos Científicos*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Alecian, E., Wade, G. y Catalá, C. (2009). Discovery of fossil magnetic fields in the intermediate-mass pre-main sequence stars. *Proceedings IAU Symposium N° 259*, 445-446.
- Boido, G. (1998). *Noticias del planeta Tierra*. Buenos Aires: A-Z.
- Bojowald, M. (2009). *Antes del Big Bang*. Buenos Aires: Editorial Sudamericana.
- Boubekeur L. y Lyth D. H. (2005). Hilltop inflation. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Issue 07, id. 010.
- Bravo, O. (1993). El enigma de La Ciudadita. Arqueoastronomía de los Nevados del Aconquija, Provincia de Tucumán. *CET Rev. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. U. N. T. San Miguel de Tucumán*, 3, 5-14.
- Bruner J. (1991) *Actos de Significado. Más allá de la revolución cognitiva*. España: Alianza Editorial.
- Bruner, J. (1988). *Realidad mental y mundos posibles*. Barcelona: Gedisa.
- Calderón J., Bustos Fierro I. y Merlo D. Utilizando un instrumento prehistórico y encontrando los puntos cardinales. *En Actas del Workshop de Difusión y Enseñanza de la Asociación Argentina de Astronomía* (disponible en la página web [www.astronomia.argentina.org.ar](http://www.astronomia.argentina.org.ar))
- Chevallard, I. (1997). *La transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado*. Buenos Aires: Aique
- Claxton, G. (1987). *Vivir y aprender. Psicología del desarrollo y del cambio en la vida cotidiana*. Madrid: Alianza.
- Cohen, I. (1977). *El nacimiento de una nueva física*. Buenos Aires: Eudeba.
- Structure*. 2<sup>nd</sup> edit. England (UK): John Wiley and Sons, Ltd.
- Díaz, E. (2000). Investigación básica, tecnología y sociedad. Kuhn y Foucault. En *La posciencia. El conocimiento científico en las postrimerías de la modernidad*. (pp. 74-80). Buenos Aires: Bilos.
- Fourez, G. (1994). *Alfabetización Científica y Tecnológica*. Buenos Aires: Colihue.
- Freire, P. (1969). *La educación como práctica de libertad*. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Ganguí, A. (2009). *Cosmología*. Buenos Aires: INET.
- Ganguí, A. (2010). *El Big Bang. La génesis de nuestra cosmología actual*. Buenos Aires: Editorial Eudeba.
- García, J. (2006). "Nuevas formas de enseñar y divulgar la astronomía". Portal.edu.ar. Argentina .
- European School of High Energy Physics. Barcelona (España).
- "Stephen Hawking y su Historia del Tiempo". Madrid: Globus.
- Gonzalez F., Novak J. (1993) *Aprendizaje significativo. Técnicas y aplicaciones*. Buenos Aires, Editorial Cincel.
- González, L. & Tarragó, M. (2004). Dominación, resistencia y tecnología: la ocupación incaica en el noroeste argentino. *Chungara. Revista de antropología chilena*. Vol. 36, n° 2, 393-406.
- González, L. & Tarragó, M. (2005). Vientos del sur. El valle de Yocavil (NOA) bajo la dominación incaica. *Estudios Atacameños n° 29*, 67-95.
- Grasshoff, G. (1990). *The history of Ptolemy's star catalogue*. New York: Springer - Verlag.
- Guth, A. H. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D (Particles and Fields)*, 23, Issue 2, 347.
- Harrison, E.R. (1991). "Cosmology: The Science of the Universe", Cambridge University Press, USA.
- Hawking, S. & Mlodinow, L. (2011). *El Gran Diseño*. Barcelona: Crítica.
- Hawking, S. & Penrose, R. (2011). *La naturaleza del espacio y el tiempo*. Buenos Aires: Debate.
- Hawking, S. (1992). *Historia del Tiempo*. Barcelona: Obras Maestras del Pensamiento Contemporáneo. Planeta-Agostini.

- Hawking, S. (2002). *Historia del Tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*. Buenos Aires: Grupo Editorial Planeta. Drakontos.
- Hawking, S. (2011). *Agujeros negros y pequeños universos*. Buenos Aires: Crítica.
- Hawking, S. (2011). *Historia del Tiempo. Del Big Bag a los agujeros negros*. Barcelona: Crítica.
- Hawking, S. y Mlodinow, L. (2011) *El Gran Diseño*. Bs.As.: Crítica.
- Holton, G. & Brush, S. (1993). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté S. A.
- Iwaniszewski, S. (2009). Por una astronomía cultural renovada. *Complutum*, 20 (2), 23.
- Kant, I. (2005). "Crítica de la Razón Práctica", Editorial Fondo de Cultura Económica, México.
- Koyré, A. (1977). *Estudios de historia del pensamiento científico*. Madrid: Siglo XXI editores.
- Koyré, A. (1979). *Del mundo cerrado al Universo infinito*. Madrid: Siglo XXI editores.
- Kuhn, T. S. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Liddle, A. y Lyth, D. (2000). *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*. 1<sup>st</sup> edit. Cambridge (UK): Cambridge University Press.
- Linde, A. (2004). *Inflation and string cosmology*. Talk at XXII Texas Symposium on Relativistic Astrophysics.
- Manassero Mass, M. A., Vázquez Alonso, A. & Acevedo Díaz, J. A. (2004). Evaluación de las actitudes del profesorado respecto a los temas CTS: Nuevos avances metodológicos. *Enseñanza de las ciencias*, 22 (2), 300.
- Merlo, D.C. (2012). Tiempo y Calendarios, en *La Astronomía y su Enseñanza en la Educación Secundaria* (L. Gramajo y otros), Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Mukhanov V.F. y Chibisov, G.V. (1981). Quantum fluctuation and 'nonsingular' universe. *JETP Letters*. 33, 532.
- Navone H., Trumper A., Manuel, Melita J. y otros (2009) Astrofísica y naturaleza de la ciencia: estrategias de intersección didáctica. En *Actas del Workshop de Difusión y Enseñanza de la Asociación Argentina de Astronomía* (disponible en la página web [www.astronomia.argentina.org.ar](http://www.astronomia.argentina.org.ar))
- Rain, D. y Thomas, E. (2001). *An introduction to the science of cosmology. Series in Astronomy and Astrophysics*. London (UK): Institute of Physics Publishing.
- Resnick, R., Halliday D., y Krane K. (2000). *Física*. Volumen I. Cuarta Edición. México D. F.: CECSA.
- Reynoso, A. D. (2003). Arqueoastronomía en Rincón Chico (Catamarca, Argentina). Monumentos del tiempo, monumentos de encuentro en el Valle de Yocavil. *Anales Nueva Época 2006. Instituto Iberoamericano. Universidad de Göteborg*
- Rodríguez Moneo, M. (1998) *Conocimiento previo y cambio conceptual*. Buenos Aires, Aique.
- Shardakoy, M. (1968). *Desarrollo del pensamiento en el escolar*. México: Grijalbo
- Starobinsky, A. A. (1979). Spectrum of relic gravitational radiation and the early state of the universe. *JETP Lett.* 30, 682.
- Stigliano, D. (1992). *Trabajo y Energía*. Buenos Aires: Editorial Métodos.
- Teixeira, P. M. (2003). A educação científica sob a perspectiva da pedagogia histórico-crítica e do movimento C.T.S. no ensino de ciencias. *Ciencia& Educación*, 9 (2), 183.
- Valdez, D. (2000). Relaciones interpersonales y práctica comunicativa en el contexto escolar. En: Chardón, C. (Comp) *Perspectivas e interrogantes en Psicología Educacional*. Buenos Aires: Eudeba.
- Vosniadou S. y Brewer W. (1992) Mental Models of the Earth. *Cognitive Psychology*, 24, 535-585
- Vosniadou S. y Brewer W. (1994) Mental Models of the day/night cycle. *Cognitive Science*, 28, 123-183

## Sobre los autores



**Lia Celina Acosta** (Catamarca, 1957.) Ing. Geodesta y Geofísica, graduada en la Universidad Nacional de Tucumán en 1984. Fue Docente en la cátedra de Geodesia Superior I en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la U. N. T. Docente en los profesorados en Física y Matemática, Instituto de Estudios Superiores Santa María, desde 1992. Cursa la Maestría en Enseñanza de las Ciencias, área Física, U. N. T. Integra de un equipo de investigación educativa en la U. N. T. dirigido por la Lic. Leonor C. de Cudmani. Presentó ponencias en congresos, en temas relacionados con la enseñanza de la energía y la enseñanza de la Astronomía utilizando como recurso la Arqueoastronomía.



**Eugenio Valiero** (Gualeguay, 1978.) Desde su educación secundaria tomó el gusto por la Física. Estudió en el Profesorado de Matemática, Física y Cosmografía en el IES Leloir, donde hoy es docente de algunas de las cátedras de las carreras que allí se ofrecen. También es profesor de la Esc. “Roberto Beracochea”, en la misma localidad.. En 2011 se graduó como Licenciado en la Enseñanza de la Matemática, estudios que cursó en la Universidad Nacional de Entre Ríos UNER, y que culminó en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora UNLZ. Actualmente estudia en el Profesorado de Pedagogía en la Universidad Autónoma de Entre Ríos UADER.



**Roberto Ferrari** Profesor de Física egresado de la Universidad de Buenos Aires. Realizó sus estudios en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales en el CEFIEC. Desde el año 2007 se desempeña en el Instituto Superior de Formación Docente y Técnico N° 4 de 9 de Julio, Buenos Aires, como profesor de Física, Astronomía, Epistemología e Historia de la Física. Desde el año 2002 ejerce como profesor de Física y actualmente es vicedirector del nivel secundario en el Instituto Marianista San Agustín de la misma ciudad. Además, integra el Equipo Técnico Regional de la región 15 de la provincia de Buenos Aires como capacitador de Física.



**Daniel Stigliano** Profesor en Química, Licenciado en Educación y Magíster en Psicología Cognitiva. Fue profesor de Enseñanza de las Ciencias Naturales en el ISFD 45 de Haedo y en la Escuela Normal Superior Nº 1 de la CABA. Profesor de Didáctica en el ISFD 107 de Cañuelas, de “Problemática del Aprendizaje Universitario” en las Escuelas de Postgrado de la UBA y la UNER y profesor invitado del IPM de México. Miembro de la Asociación Mexicana de Metodología de la Ciencia y la Investigación. Es autor de tres libros de texto de Ciencias Naturales y Tecnología para la EGB, tres libros de divulgación científica para la enseñanza media y coautor del libro “Enseñar y Aprender en Grupos Cooperativos” (2006) Editorial Novedades Educativas



**David Merlo** Doctor en Astronomía, Profesor de Física, Profesor de Matemática y Analista de Sistemas Informáticos de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Se desempeñó como docente de matemática, física y programación en los IPEM 35, IPETYM 246, IPET 249 e IES “Simón Bolívar” de Córdoba. Fue becario de AECI (España), de SeCyT (UNC) y de la Fundación Fulbright. Miembro de la Asociación Argentina de Astronomía y de la Unión Astronómica Internacional. Es coautor de un libro de texto de Ciencias Naturales (EGB3) y ha publicado cerca de 30 artículos en revistas nacionales e internacionales de astronomía. Actualmente es Profesor Adjunto del Obs.Astr.Cba (UNC) y docente de astronomía y óptica en el IES “Simón Bolívar”.





# SERIE CUADERNOS DE TRABAJO DOCENTES APRENDIENDO EN RED

El sector de Educación de la Oficina de Montevideo-Representación ante el MERCOSUR implementa sus acciones programáticas a nivel nacional y subregional en el marco del Proyecto Regional de Educación para América Latina y el Caribe (EPT/PRELAC 2007).

Los ministros de Educación de la Región han afirmado que la educación es un bien público y llave para la construcción de un mundo más justo, señalando siete temas centrales en sus recomendaciones ([www.unesco.org/Santiago](http://www.unesco.org/Santiago)). Esta nueva serie de publicaciones, que hemos titulado Docentes Aprendiendo en Red (DAR) se nutre selectivamente de las recomendaciones referentes al "derecho de las personas a aprender a lo largo de la vida" desde "enfoques educativos para la diversidad, la inclusión y la cohesión social". La serie pretende acercar al docente lector materiales de apoyo educativo, elaborados por algunos de sus pares docentes que han sido participantes activos de proyectos innovadores asistidos por UNESCO.

A nivel nacional, implementar estas recomendaciones potencia una de las funciones de la UNESCO que denominamos "laboratorio de ideas". En ese sentido, la temática de acortar distancias entre las investigaciones universitarias y la formación de docentes en ciencias es uno de nuestros centros de interés programático. Entendemos que trabajar a favor de los educadores de la enseñanza demanda asistir técnicamente en el diseño de proyectores innovadores fundamentalmente en dos aspectos:

a) Requerir y fomentar equipos con profesionales diversos que sean referentes para el tema seleccionado y se encuentren dispuestos a "Aprender juntos" (Delors 1996)

b) Incluir en el diseño instancias colectivas de formación, discusión y planteo de dificultades conceptuales, con el objetivo de estimular aprendizaje y capacidades de producción de materiales escritos por docentes.

Los cuadernos de trabajo "Escritura en Ciencias" en el marco de la serie DAR han sido generados por el Instituto Nacional de Formación Docente del Ministerio de Educación de la Nación Argentina a través de una convocatoria abierta a los Institutos de Formación Docente de gestión pública de todo el país.

Los cuadernos de Escritura en Ciencias se ponen a disposición de formadores y alumnos de la formación docente como materiales de apoyo educativo elaborados por pares que han sido participantes activos como integrantes de equipos de trabajo que llevan adelante de proyectos innovadores asistidos por UNESCO.

El trabajo de los coordinadores ha sido complejo e indispensable para el éxito de este tipo de proyecto. Las contrapartes por países han hecho propio este diseño y ajustado a sus realidades temáticas y de arquitectura (presencial y/o virtual). De esta manera, la temática de Paraguay es "La Escritura en Paraguay", en Argentina "Escritura en Ciencias" y en Uruguay "Celebrando el Año Internacional de la Química". Los coordinadores generales, así como los de Escritura han desarrollado un análisis crítico del proceso y han sabido guiar las intrincadas relaciones generadas cuando se "aprende haciendo" contribuyendo a resolver conflictos y logrando el mejor documento posible. En ese sentido, vaya a todos ellos nuestro agradecimiento.

María Paz Echeverriarza  
Profesional del Programa Educación  
UNESCO Montevideo



Ejemplar de distribución gratuita. Prohibida su venta.