

**LA ASTRONOMÍA EN LA ENCRUCIJADA
DE LA FILOSOFÍA,
LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA**

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL
EXCMO. SR. DR. D. RAFAEL BACHILLER GARCÍA

EN EL ACTO DE SU TOMA DE POSESIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO
EL DÍA 16 DE MAYO DE 2012

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO DE NÚMERO
EXCMO. SR. DR. D. FEDERICO LÓPEZ MATEOS
DE LA SECCIÓN DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

MADRID
MMXII

Depósito Legal: GU-107/2012

Maquetación e impresión: Aventura Gráfica, S.L.

A Dora, Diana e Irene

ÍNDICE

Presentación	9
1. Introducción	13
1.1. ¿Astronomía o Astrofísica?	13
2. La Astronomía en el universo de las ideas	15
2.1. De la Antigüedad a la concepción contemporánea del Cosmos	15
2.2. Cosmología física y Cosmología filosófica	18
2.3. Poder predictivo y determinismo	19
3. Astronomía y otras Ciencias	23
3.1. Vocación matemática	24
3.2. La Química y los astros	26
3.3. Astronomía y Geología: dos perspectivas sobre la Tierra y el Sistema Solar	28
3.4. Astrobiología: ¿vida en otros mundos?	29
4. La Nueva Física	33
5. Astronomía y Tecnología	37
6. Astronomía en España	41
Conclusión y perspectivas	45
Bibliografía	49
Discurso de contestación del Dr. D. Federico López Mateos	53
Bibliografía	59

Excmo. Sr. Doctor Presidente de la Real Academia de Doctores de España,

Excmos. Señoras y Señores Doctores Académicos,

Señoras y Señores,

Deseo en primer lugar expresar mi profundo agradecimiento a esta Institución por acogerme en su seno y, más concretamente, por recibirme como miembro de número en la Sección de Ciencias Experimentales. Deseo reconocer la confianza que en mí depositaron los Doctores López Mateos, García Velarde y Díez Gómez al presentar mi candidatura y a los académicos que, al concederme su voto en una reunión plenaria, reconocieron mis méritos.

Mi agradecimiento más especial va dirigido al Doctor Don Federico López Mateos quien el 4 de mayo de 2008 aceptó el trabajo de contestar a mi disertación de ingreso como académico correspondiente, luego actuó como enérgico estímulo para plantear y defender mi candidatura como académico de número y ahora, dando renovadas muestras de generosidad, ha aceptado el encargo de responder a este discurso.

Quienes me conocen pueden refrendar el honor que supone para mí el ser miembro de esta Real Academia de Doctores de España, una institución de tan larga tradición que aglutina conocimientos y experiencia. La Academia de Todos los Saberes, como me gusta denominarla a mí, sería una designación más precisa.

Y es que esta insigne institución, que lleva largas décadas consagrada a la difusión de las Artes y las Ciencias con la peculiar perspectiva multidisciplinar que la distingue, merecería como ha señalado el Dr. López Mateos constituir, junto con otras Academias, un “Senado Académico”, esto es, una institución que, a semejanza de la “Asamblea de patricios” de la Antigua Roma, pudiera asesorar sobre los objetivos trascendentales de Estado que se encuentran al margen de compromisos e intereses políticos, como son, por ejemplo, los planes de enseñanza, la carrera académica o el aprovechamiento de los recur-

tos naturales: materias primas, agua, energía, medio ambiente, etc., por citar algunos de los más relevantes a las áreas de trabajo de la Sección de Ciencias Experimentales.

Constituye un excepcional honor para mí el representar a la Astronomía en nuestra Institución por vez primera. La Astronomía no sólo es una de las Ciencias más antiguas, sino una de las más permanentes y dinámicas. La Astronomía nos hace reflexionar sobre el lugar del hombre en el Cosmos y nos induce a filosofar y soñar. No resulta sorprendente que Platón, verdadero protagonista de aquel seminal bosque de Academos, considerase que “la Astronomía eleva el alma hacia las alturas, conduciéndonos así desde las cosas de este mundo a otro superior”.

Particularmente emocionante me resulta el hecho de que la medalla que voy a recibir, la número 65, fue ostentada antes por un investigador y persona excepcional: el Dr. D. Sixto Ríos Insua. Un matemático que, hoy más que nunca, constituye un singular ejemplo para todos nosotros y no sólo por su exitosa carrera profesional desarrollada en el campo del Análisis de Decisiones, campo en el que contribuyó con valiosas herramientas de computación, sino por la lección humana que nos impartió cuando, en plena madurez intelectual, su vida se vio truncada por una grave enfermedad. Aún en condiciones extremadamente difíciles, Sixto Ríos Insua no dejó de trabajar y de investigar con ahínco hasta el último día de su vida. La memoria del Dr. Ríos Insua sirve así de viva referencia, en estos tiempos desconcertantes y caóticos, a los que tenemos la suerte de dedicar nuestra vida a la que yo considero noble tarea de la investigación científica cuando va encaminada a la forja de un mundo mejor.

Me enorgullece recordar que el propio Dr. Ríos Insua apoyase en el año 2007 mi entrada en esta Academia como académico correspondiente. Me emociona pensar que durante los estudios de licenciatura coincidí durante varios años con el Dr. Ríos en nuestra entrañable Universidad Complutense. Trataré que esta medalla 65 sea un puente que, a través del tiempo y del espacio, me mantenga unido con Sixto Ríos Insua, el insigne y entrañable investigador que siempre nos servirá de ejemplo. “El trabajo constante es la mejor semilla para lograr éxitos científicos” decía, citando a su padre, desde esta misma tribuna, el día de su ingreso en esta Real Academia. Que su trabajo constante nos sea de inspiración a todos.

Además, en un día tan señalado para mí, quiero hacer pública mi gratitud a mis numerosos compañeros en el apasionante viaje de la vida. En el ámbito académico y profesional he de reconocer la labor de muchos de los maestros

y profesores que me guiaron y acompañaron desde que se despertó en mí la curiosidad por las Ciencias hasta que emprendí mi carrera en la Astronomía. Deseo agradecer al Dr. D. Jesús Gómez González por creer en mis posibilidades desde que me encontraba finalizando mis estudios de Física en la Universidad Complutense y al Dr. D. Alain Omont que me enseñó el valor del trabajo riguroso. Durante muchos años, empezando por los que pasamos juntos en Francia, el Dr. D. José Cernicharo está siendo, además de compañero incondicional, una fuente de inspiración continua.

Desde que regresé a España, todos los compañeros y amigos del Observatorio Astronómico Nacional, tanto astrónomos como ingenieros y el resto del personal, crearon el ámbito ideal para el trabajo. Las discusiones vivas e inteligentes han constituido siempre un estímulo para que nos fijásemos nuevos objetivos y para emprender nuevos proyectos. Durante mi carrera he tenido la suerte de colaborar con astrónomos de, prácticamente, todos los países que poseen actividad en Radioastronomía. Gracias a ello disfruto de la relación con personas verdaderamente extraordinarias, tanto a nivel profesional como humano. El sentimiento de pertenecer a esta comunidad de astrónomos es lo que siempre me comunica renovadas energías en momentos profesionales difíciles.

En un plano más personal deseo, en este día tan importante para mí, recordar muy especialmente a mis padres. Yo puedo dar fe de lo certera que es la exclamación de nuestro gran Luis Vives “¡Cuán grande riqueza es, aun entre los pobres, el ser hijo de buenos padres!”.

Durante estos años, mi esposa y mis dos hijas me han proporcionado el entorno óptimo para desarrollar mi trabajo. Muy especialmente, ha sido la labor abnegada e incondicional de mi esposa, Dora, la que ha hecho posible mi quehacer en el día a día, además de haberme comunicado el ánimo y el apoyo necesarios en todo momento.

También deseo agradecer la compañía permanente de mi hermana Mariabel, su actitud tan comprensiva y su trato verdaderamente fraternal.

Finalmente, numerosos compañeros y amigos tanto dentro como fuera del entorno profesional han contribuido, a menudo sin saberlo, a mi labor científica. Ellos son imprescindibles para que mi mente se conserve despierta y abierta al mundo.

A estas alturas ya se habrán apercibido Vds. que esta primera parte de mi intervención es la que me resulta más grata. Pero comprendo que no debo demorarme más y debo abordar sin más tardar el tema de mi discurso.

1. INTRODUCCIÓN

En la disertación de mi ingreso como académico correspondiente tuve oportunidad de presentar algunos resultados de las investigaciones a las que vengo consagrando mi carrera profesional sobre los mecanismos de formación estelar, así como algunas reflexiones sobre la concepción actual de la formación y evolución de nuestro Universo. Para este discurso he preferido un tema más general. Como reflejo del carácter multidisciplinar de esta Real Academia de Doctores, voy a presentar a su consideración algunas reflexiones sobre el carácter multidisciplinar de la Astronomía.

En primer lugar voy a mostrar cómo la Astronomía ha estado desde la Antigüedad, y a mi juicio sigue estando en nuestros días, como telón de fondo de las concepciones filosóficas del mundo.

A continuación subrayaré cómo la Astronomía interacciona con las otras Ciencias y, muy particularmente, con las Matemáticas a las que me refería más arriba al recordar la figura del Dr. Sixto Ríos Insúa. Y es que la Astronomía ha sido pura Matemática durante largos siglos, hasta el nacimiento de la Astrofísica en el siglo XIX.

En tercer lugar, haré hincapié en las contribuciones de la Astronomía en la construcción de una nueva Ciencia Física. También examinaré la estrecha relación de la Astronomía con diferentes técnicas y en su papel como motor tecnológico y de innovación. Finalmente, llamaré su atención sobre la espectacular eclosión experimentada por la Astronomía en nuestro país en el curso de los últimos treinta años.

Espero mostrar, en definitiva, que, tanto por sus peculiaridades, como por su importancia en el marco general de la Ciencia y la Tecnología, como por el papel relevante que juega en nuestro país, la Astronomía es una Ciencia que merece tener su sitio en la Real Academia de Doctores de España.

1.1 ¿Astronomía o Astrofísica?

Antes de seguir adelante quiero detenerme en el uso que hago del término “Astronomía” pues en la Ciencia contemporánea, intentando lograr un mayor

grado de precisión o quizás temiendo confusiones, se duda a veces entre el uso de los términos “Astronomía” y “Astrofísica”. Este último parece acuñado, de manera bien justificada, para designar el estudio de la naturaleza física de los astros, mientras que el primero, más clásico, parece reservado al estudio de las posiciones y movimientos de los astros sin preocuparse por su naturaleza física intrínseca.

En mi opinión, sin embargo, ambos términos se confunden y se entremezclan en la Ciencia contemporánea de manera inextricable. Pensemos por ejemplo en la expansión del Universo; por un lado, las galaxias juegan aquí el papel de balizas cuyas posiciones y velocidades revelan la evolución geométrica del Universo, por lo que parece estar en el dominio de la Astronomía, pero por otro lado, el análisis de esta estructura geométrica requiere el examen astrofísico de las galaxias para medir sus velocidades de recesión. Vemos pues cómo Astronomía y Astrofísica llegan al punto de confundirse e identificarse. Por ello, yo prefiero utilizar el término “Astronomía” para englobar ambos aspectos. “Astronomía” me parece una designación más clásica, y más general que puede comprender a otros términos aparentemente más específicos (Astrofísica, Astroquímica, Astrogeología, etc) pero de contornos poco definidos.

2. LA ASTRONOMÍA EN EL UNIVERSO DE LAS IDEAS

Ofreciendo una percepción racionalista del espacio y del tiempo, la Astronomía ha jugado un papel decisivo emplazando al hombre en el Cosmos contribuyendo así, de manera muy significativa, al desarrollo cultural de la Humanidad.

Citemos como primer ejemplo que el establecimiento de los calendarios hizo posible a la Historia; esto es, la construcción y progresivo perfeccionamiento del calendario astronómico, estructurado en días (correspondientes al movimiento de rotación de la Tierra), años (correspondientes al movimiento de traslación de nuestro planeta) y de manera secundaria meses (de origen lunar) ha hecho posible que la Historia se desarrolle como Ciencia. Aunque no puede ser exhaustivo, hagamos un recorrido por algunos episodios de la Historia que muestran cómo el estudio de los astros ha influido de manera decisiva tanto en la comprensión de la Naturaleza como en el desarrollo y perfeccionamiento de las ideas filosóficas.

2.1 De la Antigüedad a la concepción contemporánea del Cosmos

Hace unos dos mil quinientos años que Heráclito (535-484 a.C.) ya se refería al Mundo con el término Cosmos (del griego, “ordenar”) sin duda para resaltar su armonía. Heráclito consideraba que el cambio era parte de la esencia de nuestro mundo: “Este Cosmos, el mismo para todos, ninguno de los dioses ni de los hombres lo ha hecho, sino que siempre existió, existe y existirá como fuego siempre vivo...”. Sin embargo, más que una entidad bien unificada, durante muchos siglos la Humanidad –siguiendo una concepción original desarrollada por Platón (ca. 428-347 a.C.) y Aristóteles (384-322 a.C.)- consideró al Cosmos una entidad organizada de manera jerárquica. Abundando en ideas pitagóricas, las figuras geométricas, en particular el círculo y la esfera, jugaban en estos modelos un papel fundamental.

Aunque es Kepler (1571-1630) quien descubre la forma elíptica de las órbitas planetarias, en un principio pensaba en un Cosmos platónico en el que el movimiento de los planetas se rige por las leyes pitagóricas de la armonía.

En su modelo del Cosmos no era casualidad que el número de planetas fuera uno más que el número de poliedros perfectos y, firme partidario del modelo copernicano, se esforzó por demostrar que las distancias de los planetas al Sol estaban establecidas por una configuración geométrica en la que esferas sucesivas estaban inscritas en poliedros perfectos. Mercurio estaba en la esfera más interior, mientras que los otros cinco planetas conocidos en la época (Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno) estarían situados en el interior de los cinco sólidos platónicos correspondientes también a los cinco elementos clásicos.

Sin embargo, en el Siglo de las Luces, la Astronomía sufre una auténtica conmoción. El 13 de marzo de 1781 William Herschel (1738-1822) escribió en su cuaderno de observaciones que había observado en Géminis “una curiosa estrella difusa” que era “visiblemente más grande que el resto de las estrellas en el mismo campo de visión”. De hecho, este astro no podía ser una estrella pues tenía forma de “disco” y además se desplazaba respecto del fondo de estrellas fijas. Con esta forma y desplazamiento, el nuevo astro tan sólo podía ser un objeto del Sistema Solar: un cometa, un satélite o un planeta. Como las posiciones de los planetas, rodeados de sus satélites, eran bien conocidas, Herschel concluyó que se trataba de un nuevo cometa y así lo anunció. Pero las observaciones que siguieron mostraron que el nuevo astro no tenía los bordes difusos de los cometas, sino que su contorno era nítido y definido. Además, su movimiento no era el acostumbrado de las órbitas fuertemente alargadas de los cometas, sino que seguía una órbita lenta y casi circular. La lentitud de su movimiento claramente indicaba que se trataba de un objeto más lejano del Sol que el propio Saturno.

La realidad acabó pronto por imponerse: 173 años después de las primeras observaciones que Galileo (1564-1642) realizó con telescopio, Herschel había descubierto un nuevo planeta. Este planeta estaba situado respecto del Sol al doble de distancia que Saturno. Desde la Antigüedad tan sólo se conocían 5 planetas (6 desde que Copérnico incluyó a la Tierra como uno más); pero ahora, con el descubrimiento de uno nuevo (al que se daría el nombre de Urano) el Sistema Solar se veía ampliado súbitamente. Había que revisar de manera urgente la concepción que se había tenido hasta entonces del Sistema Solar. Era mucho más grande de lo que pensó Kepler y, además, ahora parecía plausible que pudiese haber planetas aún más lejanos.

Herschel también realizó un primer mapa de nuestra galaxia, la Vía Láctea, un mapa que fue considerado como la imagen fiable de nuestro Universo

durante más de un siglo. A principios del s. XX, el tamaño de la Vía Láctea, estimado por diferentes métodos, era inferior a unos 100.000 años-luz.

El gran descubrimiento que nos hizo conscientes de la inmensidad del Universo lo realizó el astrónomo Edwin Hubble (1889-1953) en la década de los 1920 con el mayor telescopio del mundo en ese momento (el refractor de 2,5 metros de diámetro en Monte Wilson, EEUU). Hubble identificó varias estrellas Cefeidas en la nebulosa de Andrómeda (que por entonces se consideraba una nube dentro de la Vía Láctea), y utilizando la conocida relación entre el periodo y la luminosidad de estas estrellas variables, estimó la distancia a Andrómeda en unos 900.000 años-luz. Hoy sabemos, gracias a medidas más precisas, que la distancia real es de unos 2,5 millones de años-luz.

Hubble repitió sus medidas de Cefeidas en otras nebulosas espirales llegando siempre a la misma conclusión: se encontraban fuera, y muy lejos, de la Vía Láctea. Eran auténticos “universos-isla” y nuestra Vía Láctea no era más que una de tantísimas, incontables, galaxias que pueblan el Cosmos. Las medidas de Hubble permitieron apreciar que vivimos en un Universo mucho más grande que la Vía Láctea, un Universo abismal e inmenso. Vemos pues cómo la historia de la Astronomía ha sido, como tan bellamente expresó el propio Edwin Hubble, la “historia de los horizontes que retroceden”.

El antropocentrismo ya había sufrido un duro golpe en el s. XVI cuando Copérnico (1473-1543) relegó a la Tierra del centro del Universo al papel de un planeta más (y de los menores) en nuestro Sistema Solar. El revés era ahora mucho más acusado. No solo nuestro planeta, o nuestro Sistema Solar, aparecen insignificantes, sino que nuestra majestuosa galaxia, que domina el aspecto de nuestro cielo formando lo que en España denominamos el Camino De Santiago, pasa a ser un pequeño grano de arena en la inmensidad cósmica.

El legado de Hubble tiene un alcance aún mayor. Ayudado por su colaborador Milton Humason (1891-1972), realizó medidas espectroscópicas de numerosas galaxias llegando a la sorprendente conclusión de que, en todas ellas, la frecuencia de la radiación emitida estaba desplazada hacia el rojo, con la sorprendente implicación de que todas las galaxias se alejan de nosotros. Comparando la velocidad de expansión de las galaxias con las distancias que nos separan de ellas, dedujo la bella relación lineal conocida hoy como Ley de Hubble, que nos muestra cómo la velocidad de recesión de las galaxias aumenta linealmente con su distancia.

La explicación teórica de tal relación empírica la proporcionó en 1931 Georges Lemaître (1894-1966), un sacerdote católico y astrónomo belga buen

conocedor de la teoría de la Relatividad general, enunciada por Albert Einstein (1879-1955) en 1917. En una publicación en *Nature*, Lemaître expuso su teoría sobre el ‘átomo primitivo’: una solución de las ecuaciones de Einstein que indicaba que el Universo se había originado en un punto primordial y se encontraba expandiéndose desde entonces. Esta teoría, que interpretaba la Ley de Hubble como la manifestación experimental de la expansión del Universo, ha llegado hasta nuestros días con el nombre de teoría del Big Bang o de la Gran Explosión.

Unos años después de la teoría de la Relatividad, entrará en juego la Mecánica cuántica, redondeando así la Física del s. XX, y ofreciendo el escenario teórico idóneo para la interpretación de los datos cada vez más precisos que se iban obteniendo con grandes telescopios.

Aunque con múltiples refinamientos, la teoría de la Gran Explosión es ampliamente aceptada hoy por la inmensa mayoría de los astrónomos y, como no podría ser de otra manera, tanto la inmensidad del Universo puesta de manifiesto por Hubble como la teoría ideada por Lemaître para explicar su origen, tienen un impacto de gran relevancia en todo el entramado científico-filosófico de la civilización moderna.

2.2 *Cosmología física y Cosmología filosófica.*

De manera natural, desde la Antigüedad hasta nuestros días, la Astronomía ha tenido entre sus objetivos centrales el estudio global del Universo, incluyendo en estos estudios las teorías sobre su estructura a gran escala, su origen, su evolución y su destino. Estos estudios constituyen el campo de trabajo de la *Cosmología física*. Por su lado, la *Cosmología filosófica* es esa parte de la metafísica espacial que puede considerarse sinónimo de la Filosofía del espacio y el tiempo, que estudia el mundo en su globalidad, esto es, el Universo considerado como colección de entidades físicas.

Newton (1643-1727), al introducir el estudio científico del espacio y del tiempo, había proporcionado un marco inmutable en el que el Universo puede ser representado desde un punto de vista geométrico y global que resulta, aún hoy, extremadamente útil para la descripción de muchos fenómenos físicos. Parece ser que el término “Cosmología” fue acuñado en tiempos de Newton, pero en un contexto puramente filosófico, concretamente por el racionalista alemán Christian Wolff (1679-1754) que influyó de manera decisiva en Kant (1724-1804), quien lo consideraba “el mayor de todos los filósofos dogmáti-

cos". Wolff publicó en 1731 su "Cosmologia generalis", cinco décadas antes de que Kant publicase sus reflexiones sobre el espacio y el tiempo (en particular en la "Crítica de la razón pura" de 1781) y de que el astrónomo William Herschel dedujese la forma de nuestra galaxia, descubrimiento que, para los astrónomos, señala el surgimiento de la Cosmología física moderna. Resulta sorprendente que, en esta misma época, Kant ya especulase con los "universos-isla", anticipando así el descubrimiento de Hubble de que el Universo es un conjunto de galaxias, galaxias similares a islas materiales en un océano abismal y predominantemente vacío.

Pero como se observa, desde el siglo XVIII Cosmología física y Cosmología filosófica no pueden ser consideradas de manera independiente y ambas se confunden hasta el extremo de identificarse. Kant, el prototipo de hombre ilustrado, filosofando sobre el espacio y las galaxias ("universos-isla") encuentra un eco en físicos del s. XX que, como Alexander Friedman (1888-1925), especulan sobre el origen o creación del Universo,

La teoría de la Gran Explosión es la concepción mejor aceptada en la actualidad para describir el origen y evolución del Cosmos, hasta tal punto que a veces nos referimos a ella como "teoría estándar". Pero conviene señalar que no hay un modelo único de Gran Explosión, sino que la teoría describe toda una familia de modelos que se diferencian por la geometría del espacio-tiempo. Cuando se afirma hoy que "el Universo es plano" nos referimos a que los datos observacionales parecen favorecer un modelo en el que el espacio tiene curvatura nula y en el que la expansión podría continuar de manera indefinida.

Es cierto que la Cosmología ha dejado de ser un conjunto de ideas o especulaciones más o menos acertadas para convertirse en una Ciencia cuantitativa y precisa. Pero, naturalmente, todas estas conclusiones sobre la geometría y sobre el destino del Universo deben ser tomadas con mucha cautela, pues incluso los parámetros cosmológicos fundamentales (la densidad bariónica media del Universo, la constante de Hubble, la edad y el tamaño del Universo, etc.) están sometidos a escrutinios continuos por todos los métodos observacionales posibles y, de manera incesante, los valores se revisan y se refinan.

2.3 Poder predictivo y determinismo

El poder predictivo de la Astronomía, ejercido desde la Antigüedad para prever las estaciones o los eclipses, contribuyó a dar un enorme prestigio a la Ciencia y al método científico, y alcanzó su máximo esplendor en los apasio-

nantes años de la Ilustración. Como ha señalado el académico Dr. D. Pedro Rocamora y García-Valls, es en el Siglo de las Luces cuando “comienza a rendirse culto a la inteligencia y la Ciencia, supeditando la verdad a la razón, e introduciendo al hombre en una amplitud de visión realista frente a todo fanatismo dogmático”.

La Ilustración, en efecto, establece que el conocimiento solo puede tener dos fuentes: la razón y la experiencia. La razón pasa por tanto a ser, más que un mero móvil de la conducta humana, la herramienta fundamental del conocimiento. Newton, realizando unos desarrollos espectaculares en el campo de las Ciencias Físicas, estableció un modelo que será pronto continuado por la Química, la Biología e incluso la Sociología y la Psicología. Condorcet (1743-1794), desde su escondrijo en el que se refugiaba del Terror, redacta su testamento espiritual bajo el título de “Esquisse d’un tableau historique des progrès de l’esprit humain”, expresando la creencia generalizada en los sabios de su tiempo de que, a pesar de todos los retrasos, la humanidad podrá acceder a un estado de mayor perfección y bienestar gracias al progreso y a la difusión del saber científico.

El espíritu ilustrado también parte del principio de que ninguna autoridad, por muy establecida y prestigiosa que fuere, se encuentra al resguardo de la crítica. Las predicciones realizadas por las teorías debían ser contrastadas experimentalmente. Tanto las prestigiosas teorías de un Descartes (1596-1650) como las de un Newton fueron puestas a prueba mediante laboriosos experimentos, que a veces se llevaron a cabo realizando costosas expediciones científicas a lugares remotos del planeta.

El poder predictivo de la Astronomía alcanzó un hito sobresaliente durante la Ilustración gracias al cometa Halley y, por eso, voy a detenerme a comentar este apasionante episodio.

Aunque Edmund Halley (1656-1742) era 14 años mayor que Isaac Newton, ambos mantuvieron una gran amistad durante largos años. En la década de los 1680, Halley persuadió (y ayudó monetariamente) a su amigo para que publicase los Principia. Por lo tanto, Halley estaba muy al corriente de las predicciones de la teoría de la Gravitación sobre las órbitas de los cometas que debían hacerlos visitar el entorno solar de manera periódica. Sólo los objetos más rápidos podrían escapar a la gravitación solar. Halley se dedicó a buscar posibles candidatos históricos de los que se pudiese esperar su regreso. En 1682 había pasado un cometa brillante con órbita retrógrada (de sentido contrario a las de los planetas), que parecía muy similar a los cometas de 1607

y 1531. Ciertamente los dos intervalos que mediaban entre los 3 cometas no eran idénticos, pero esto podía deberse a las perturbaciones que los planetas debían causar sobre la órbita del cometa. Halley comunicó pues a Newton su sospecha de que los cometas de 1531, 1607 y 1682 eran el mismo objeto, y predijo que este cometa reaparecería “a finales de 1758 o principios de 1759”.

Halley, que murió en 1742, no pudo asistir a los eventos que tuvieron lugar en la fecha que él mismo había previsto para el regreso del cometa. Según se aproximaba esa fecha, la expectación crecía y no faltaban predicciones catastróficas que auguraban la colisión del cometa con la Tierra. En París, el astrónomo Alexis Clairaut (1713-1765) refinó los cálculos de Halley y predijo que el cometa pasaría por su perihelio en Abril de 1759. Fue un granjero alemán el primero en observar el regreso del cometa el 25 de diciembre de 1758. El astrónomo francés Charles Messier (1730-1817) lo comenzó a observar de manera profesional unos días más tarde. El cometa, tras mostrarse en todo su esplendor, pasó por su perihelio en Marzo de 1759 y emprendió el camino de vuelta. Su órbita retrógrada era la misma que la de los cometas de 1531, 1607 y 1682. Claramente se trataba de un mismo objeto, un único cometa: el cometa Halley.

Así pues, el esperado regreso del cometa Halley en 1759 constituyó un nuevo y espectacular triunfo de las teorías de Newton. El regreso del Halley -al igual que los regresos que se predicen para muchos cometas periódicos- sigue constituyendo una bella ilustración de la capacidad predictiva de la Ciencia.

La reverencia por el poder predictivo de la Ciencia llegó a ser tal que, en 1776, el matemático y astrónomo francés Pierre Simon Laplace (1749-1827) en los 5 volúmenes de su “*Traité de Mécanique Céleste*”, afirmó categórico que, si se conociera la velocidad y la posición de todas las partículas del Universo en un instante, se podrían predecir su pasado y futuro. Durante más de 100 años esta afirmación pareció correcta y el mundo de las ideas estuvo dominado por este determinismo causal. Según esta doctrina, incluso el pensamiento y las acciones humanas estarían determinados por las condiciones iniciales, lo que extendería la validez del determinismo a la Sociología y a la Economía. En este contexto, nos encontramos con un determinismo de carácter débil en el que se permite que los individuos estén dotados de libre albedrío.

Hay, sin embargo, algunas formas del determinismo fuerte aplicado al comportamiento individual que no solo niegan cualquier papel al azar si no que niegan la existencia del libre albedrío. De manera similar a lo que opina-

ba Laplace para la posición de todas las partículas del Universo, conociendo la estructura genética y la circunstancia con las que se origina un individuo, podría llegar a conocerse su evolución. El hombre estaría así, de manera intrínseca, privado de libertad. Vemos pues como el determinismo astronómico encuentra su eco en los lejanos campos de la Psicología.

El determinismo encuentra su último valedor en el eminente Albert Einstein a quién, entre muchísimos otros méritos, debemos reconocerle el arrojo de revelarse contra el desconcertante papel que juega el azar en la Mecánica cuántica. Sin embargo, pocos físicos discuten hoy el importante papel jugado por el azar a nivel atómico y subatómico, y aunque el mundo macroscópico aparezca como determinista en gran medida, la amplificación de efectos cuánticos en escalas progresivamente mayores puede introducir el azar, y la libertad, en la escala humana.

3. ASTRONOMÍA Y OTRAS CIENCIAS

Es cierto que ninguna Ciencia es un compartimento estanco en nuestros días, pero no es menos cierto que la Astronomía tiene una capacidad extraordinaria para interaccionar con numerosas disciplinas. Al tratar de describir y de explicar el comportamiento y la naturaleza de los cuerpos celestes, la Astronomía trata con sistemas físicos de alta complejidad. Rara vez puede reproducirse en el laboratorio el sistema real de una estrella o de una nube interestelar, con sus condiciones físicas extremas. Al considerar estos objetos en su totalidad, el astrónomo se ve obligado a invocar a todas las Ciencias de la naturaleza. Las Matemáticas describen la Mecánica celeste, las órbitas, las perturbaciones y los movimientos caóticos de sistemas complejos. La Física ofrece las últimas causas de todos estos comportamientos y predice la evolución de sistemas peculiares como una estrella o el Universo en su conjunto. La Química explica la composición de los astros y de su evolución, desde la nucleosíntesis en los interiores estelares hasta la generación de complejas moléculas en nubes interestelares y circunestelares. La Geología describe la constitución de los planetas de manera comparada, poniendo a la Tierra en el contexto astronómico apropiado. La Biología permite aventurar en qué tipo de circunstancias astrofísicas puede llegar a generarse la vida.

Es pues con razón que el escritor y gran científico ilustrado Georg Lichtenberg (1742-1799) recuerda que la Astronomía es la Ciencia en la que el conocimiento humano aparece en su magnitud más completa, y una Ciencia a través de la cual el hombre puede aprender su pequeñez.

Todas las Ciencias exactas y naturales contribuyen a la comprensión de nuestro Cosmos. La Astronomía, al servirse del conocimiento generado por todas las Ciencias, en una situación que trata de englobar la totalidad del Universo, suele lograr un nivel de generalidad y de abstracción extremadamente alto. Pero, como si de un complicado juego de espejos se tratase, la Astronomía también sirve de fuente de inspiración y de banco de pruebas para otras Ciencias y, de hecho, algunas de las leyes fundamentales de la Física (Gravitación, Relatividad, Física nuclear) han sido derivadas, establecidas, o corroboradas, mediante observaciones astronómicas.

Así, tanto las leyes de Newton, como la teoría de la Relatividad de Einstein, como la variedad de los ingredientes químicos en la naturaleza, alcanzan su máxima universalidad cuando se los considera en un contexto astronómico. Es esta universalidad lo que hace verdaderamente maravillosas a las leyes de la Física o a la composición química de la materia. La constatación de que tales leyes y fenómenos permanezcan válidos no solo en nuestros laboratorios, o en nuestro modesto planeta, sino que su validez alcance a la totalidad del Universo conocido, esto impacta de manera sugestiva en la imaginación del hombre y es lo que nos hace sentirnos una parte indisoluble y relevante del Cosmos.

3.1 Vocación matemática

La Astronomía fue pura Matemática hasta el nacimiento de la Astrofísica en el s. XIX. La Mecánica celeste fue desarrollada desde la Astronomía para el estudio de los movimientos de los astros que son debidos a la gravitación y que están regidos por la ley de la gravitación universal de Newton.

Sin embargo, el estudio de los movimientos de los astros se remonta a épocas remotas anteriores al conocimiento de la gravitación. Fueron las leyes de Kepler que rigen las órbitas de los planetas, deducidas empíricamente en el s. XVII gracias a las excelentes observaciones de Tycho Brahe (1546-1601), las que inspiraron a Newton la ley de la gravitación. Pero, naturalmente, desde entonces se razona de manera inversa y usando la ley de Newton pueden deducirse las leyes de Kepler de manera inmediata. Las leyes de Kepler son la solución al denominado “problema de dos cuerpos” referido al Sol y a un planeta. Se trata de un problema completamente resuelto. Pero el problema matemático se complica enormemente según aumenta el número de graves y quizás resulte sorprendente pensar que ni siquiera el “problema de tres cuerpos” está hoy resuelto en el caso general. Este problema que describe la situación del Sol, la Tierra y la Luna, ocupó el quehacer de los astrónomos durante muchos siglos y puede dar una idea de la complejidad del problema de n cuerpos cuando se considera en toda su generalidad.

Al sistema Sol-Tierra-Luna dedicó Charles Eugène Delaunay (1816-1872) dos tomos de 900 páginas cada uno entre 1860 y 1867 con el objetivo de estudiar el movimiento de la Luna. En este tratado astronómico aparecen por vez primera algunos conceptos matemáticos fundamentales de la teoría del caos y una aproximación pionera al análisis funcional. Pero fue Henri Poin-

caré (1854-1912) quien encaró el “problema de los tres cuerpos restringido” asumiendo que la masa de uno de los cuerpos es mucho menor que la de los otros dos; y quien consideró el problema restringido circular, un caso especial en que se asume que dos de los cuerpos están en órbitas circulares, lo que es aproximadamente cierto para el sistema Sol-Tierra-Luna. Tales aproximaciones resultaron de gran valor para la comprensión del movimiento de nuestro satélite.

Poincaré, el último gran matemático generalista (siguiendo la estela de Gauss 1777-1855), fue capaz de entender todos los ámbitos de la disciplina Matemática (p.ej. en 1894 descubrió el grupo fundamental de un espacio topológico), pero el mayor de sus premios lo recibió por sus aportaciones al estudio del problema de tres cuerpos en una competición matemática organizada por el rey Oscar II de Suecia y Noruega en 1889. Según reconoció el matemático alemán Karl Weierstrass (1815-1897), que fue quien propuso el problema, el trabajo de Poincaré marcó “el comienzo de una nueva era en la historia de la Mecánica celeste”

En el problema de tres cuerpos circular existen cinco puntos de equilibrio llamados puntos de Lagrange. Tres de ellos son colineales con las masas principales y son inestables; los otros dos se localizan en el tercer vértice formando con las dos masas principales triángulos equiláteros. Estos puntos son estables. En el sistema Sol-Júpiter los puntos lagrangianos están en la misma órbita de Júpiter pero 60 grados por delante o por detrás y forman con el Sol y Júpiter dos triángulos equiláteros. El que estos puntos estén ocupados por asteroides (los denominados “troyanos”) constituye una bellísima confirmación astronómica de la validez de la teoría matemática.

Hay que destacar que el movimiento caótico resultante del problema de tres cuerpos no pudo ser abordado en su integridad hasta 1949 cuando el matemático uruguayo José Luis Massera (1915-2002) lo caracterizó en términos de las funciones de Lyapunov.

En el estudio del Sistema Solar, al considerar el movimiento de uno de sus cuerpos teniendo en cuenta la influencia que ejercen todos los demás, nos enfrentamos con muchos problemas que no pueden resolverse exactamente. Para encontrar soluciones aproximadas a tales problemas se desarrolló la “teoría de perturbaciones”. Por ejemplo, en el caso de un planeta alrededor del Sol, se comienza estudiando el problema de dos cuerpos y se trata la acción de los otros planetas y satélites como perturbaciones de la órbita elíptica que harán variar la posición del nodo y del perihelio.

Aplicando este método de perturbaciones al movimiento de Urano, Urbain Le Verrier (1811-1877) y John Couch Adams (1819-1892) de manera independiente, hacia 1846, detectaron la presencia de perturbaciones que debían proceder de un planeta situado más allá. Johann Galle (1812-1910) apuntó su telescopio donde le dijeron los matemáticos y descubrió el planeta Neptuno exactamente en la posición predicha. Fue la primera vez que se realizó un descubrimiento astronómico siguiendo las predicciones de unos cálculos matemáticos. Como le gustaba decir a François Arago (1786-1853), Le Verrier había sido “el hombre que descubrió un planeta con un lápiz”.

La teoría de perturbaciones tiene hoy aplicaciones variadísimas en muchos campos de la Matemática y de la Física. Por otra parte, lejos de ser una rama de la Matemática en desuso, la Mecánica celeste sigue siendo hoy de renovada utilidad para el cálculo de las órbitas de los satélites artificiales y de las sondas espaciales, disciplina que recibe el nombre de Astrodinámica.

3.2 La Química y los astros

Grandes masas de gas y polvo, denominadas ‘nubes interestelares’ pueblan las regiones entre las estrellas en la Vía Láctea y en otras galaxias, incluso en las más remotas conocidas. El gas es principalmente hidrógeno, aunque contiene cantidades significativas de otros elementos. Los pequeños granos de polvo, similares a los de arena, están constituidos por silicatos y grafito, por lo que apantallan eficientemente la radiación ambiente y, gracias a ello, en el gas pueden formarse moléculas de cierta complejidad. La disciplina que estudia estos procesos, la Astroquímica, se encuentra en la frontera entre la Física, la Química y la Astronomía, y está sufriendo una auténtica revolución en los últimos tiempos.

La molécula interestelar más abundante es la del hidrógeno (H_2), a la que sigue (con una abundancia diez mil veces menor) el monóxido de carbono (CO). Aunque el medio interestelar se encuentra muy diluido, las largas escalas de tiempo cósmico hacen que muchas reacciones químicas puedan tener lugar, dando lugar a un gas de gran riqueza molecular. Se conocen hoy más de 160 especies moleculares diferentes en el espacio.

La Química interestelar se suele desencadenar con reacciones entre moléculas o átomos neutros con iones (formados por el efecto de los rayos cósmicos). Aunque mucho más lentas, también hay reacciones entre especies neutras que llegan a ser importantes. Finalmente, los procesos químicos que

tienen lugar sobre las superficies de los granos de polvo también contribuyen significativamente a la evolución química del medio.

Gran parte de mi actividad científica está dedicada a comprender los fenómenos químicos que desencadenan las grandes eyecciones producidas por las estrellas en formación. Estos chorros bipolares de materia se propagan por el espacio circundante con velocidades supersónicas comprimiendo y calentando el gas ambiente. En los frentes de choque que se forman (a menudo en forma de arco de proa), las condiciones son favorables para destruir los granos de polvo interestelar, lo que supone una fuente de nuevas moléculas que se incorporan en la fase gaseosa. Las altas temperaturas que imperan en estas regiones sometidas a ondas de choque también son favorables al desencadenamiento de reacciones químicas endotérmicas (en particular entre especies neutras) que no tienen lugar habitualmente en el medio interestelar mientras no está sometido a tales perturbaciones.

La Química en regiones de choque tiene una sorprendente riqueza y deja una espectacular impronta en las observaciones astronómicas. Resulta particularmente interesante el comportamiento de ciertas moléculas como la de óxido de silicio, o la de agua, que tienen sus abundancias muy incrementadas en estas regiones. Las observaciones recientes que hemos llevado a cabo con ayuda del Observatorio Espacial Herschel han permitido, por vez primera, obtener una idea precisa de la abundancia y distribución espacial del agua formada en torno a las ondas de choque. De manera similar al comportamiento del óxido de silicio (que describimos en varias publicaciones de los años 1990), el vapor de agua se encuentra formando nubes discretas que se comportan como proyectiles, moviéndose a velocidades superiores a los 200.000 kilómetros por hora.

Un tema de gran interés astroquímico es el de los fullerenos, grandes moléculas que tienen la forma de una esfera hueca, de un elipsoide o de un cilindro. El más corriente de ellos es el bukminsterfullereno (C₆₀) que contiene 60 átomos de carbono organizados en los vértices de un poliedro. Estas moléculas fueron identificadas en un laboratorio terrestre hace 25 años, hallazgo por el que los químicos Harry Kroto y Richard Smalley recibieron el Premio Nobel en 1996. Pues bien, hace apenas un par de años, utilizando el telescopio Spitzer de la NASA, J. Cami (Univ. de Ontario Occidental) y colaboradores descubrieron tanto C₆₀ como C₇₀ en la nebulosa planetaria Tc1. Más recientemente, tanto este equipo como otro del Instituto de Astrofísica de Canarias han presentado nuevas detecciones de fullerenos en las envolturas de estrellas

evolucionadas y en diferentes regiones del espacio interestelar. También han proporcionado indicios de la presencia de grafeno en el medio interestelar, concretamente del C₂₄, una molécula plana bidimensional de un átomo de grosor que podría jugar un papel muy importante en la formación del polvo interestelar y que, naturalmente, debería estar relacionada con la abundancia de los hidrocarburos poliaromáticos (PAH, por sus siglas en inglés) detectados en el espacio.

Estas observaciones sugieren pues que los fullerenos (y quizás los grafenos) son muy abundantes en el Universo. Una centésima parte del carbono interestelar podría llegar a encontrarse contenido en este tipo de moléculas. La presencia en el medio interestelar de moléculas tan grandes como estas confirma que una gran complejidad molecular puede surgir en las regiones donde se forman las estrellas.

En el año 2004, Andre Geim y Konstantin Novoselov, sintetizaron el grafeno en el laboratorio. El grafeno se ha revelado tan importante por sus aplicaciones industriales y en nanotecnología que estos investigadores fueron premiados con el Nobel de Física en el año 2010.

3.3 Astronomía y Geología: dos perspectivas sobre la Tierra y el Sistema Solar

La Geología - el estudio de la componente sólida de la Tierra y de los procesos que la hacen evolucionar - tiene una relación muy directa con la Astronomía. La Tierra no es más que el tercer planeta del Sistema Solar y Geología y Astronomía se consagran a su estudio, aunque desde perspectivas diferentes. Si la Astronomía tiene una perspectiva exterior y comparativa con otros cuerpos del Sistema Solar, la Geología adopta un punto de vista más enraizado en la propia Tierra, estudiando, por ejemplo, la tectónica de placas, la estructura interna del planeta y los climas pasados y sus efectos.

Sin embargo, la exploración de otros cuerpos del Sistema Solar comenzada en el s. XX ha hecho que los geólogos hayan comenzado a estudiar tales cuerpos de una manera similar a como hacen con la Tierra. Así, a pesar de que el prefijo “geo” se refiere al nombre griego de la Tierra, oímos a menudo hablar de la Geología de la Luna, de la Geología de Marte, etc. Se ha creado así una nueva disciplina denominada “Geología planetaria” o “Astrogeología” que, en la frontera entre la Astronomía y la Geología propiamente dicha, se interesa por todos los aspectos de los planetas y de otros cuerpos del Sistema

Solar. Entre estos últimos, los meteoritos son especialmente relevantes pues nos permiten estudiar la materia extraterrestre en nuestros laboratorios terrestres utilizando todas las técnicas propias de la Geología y del análisis químico. Algunos de estos meteoritos son lunares o marcianos (como el que cayó en el Sahara en Julio de 2011) y ellos nos ayudan a comprender la evolución de estos astros.

Como ejemplo de un trabajo de Astrogeología que incumbe a ambas disciplinas, citemos el estudio reciente del meteorito Murchison (encontrado en 1969 en Australia) llevado a cabo por Hoppe et al. (2012). Estos investigadores han utilizado un método espectroscópico de muy alta sensibilidad para medir la abundancia de los isótopos del azufre, del silicio y de otros elementos, probando de esta manera que el meteorito contiene inclusiones de granos de polvo procedentes de una supernova que explotó con anterioridad a la formación de nuestro Sistema Solar. Vemos pues cómo el estudio geológico de este meteorito aporta una información astronómica de enorme valor.

3.4 Astrobiología: ¿vida en otros mundos?

Se desconocen aún los procesos que dieron lugar a la aparición de la vida en la Tierra. En particular, no queda claro si las condiciones en los océanos fueron aptas en algún momento para que surgiera la vida o si una aportación de moléculas prebióticas procedentes del medio interestelar fue imprescindible. Ciertamente, desarrollando las ideas de Oparin de los años 1920, Miller y Urey en 1952 fueron capaces de sintetizar aminoácidos en el laboratorio en condiciones que pueden considerarse análogas a las que puedan reinar en un planeta. Este tipo de experimentos han sido extendidos recientemente tratando de simular cada vez con mayor fidelidad las condiciones de la Tierra primitiva sustituyendo, por ejemplo, las descargas eléctricas por irradiación ultravioleta. Aunque estos experimentos, junto a una considerable evidencia geológica, biológica y química, ayudan a sustentar la teoría de que una primera forma de vida pudo formarse de manera espontánea mediante reacciones químicas, todavía hay muchos expertos que consideran que fue necesaria una aportación de material prebiótico extraterrestre. En cualquier caso, aunque estos experimentos sean sumamente sugestivos, desde la síntesis de aminoácidos hasta la creación de vida todavía hay muchos pasos intermedios.

Hasta ahora se venía considerando que las condiciones necesarias para la generación de la vida son extremadamente exigentes y que en la Tierra se da

una larga y complicada serie de circunstancias que ha permitido su desarrollo. Sin embargo, la presencia entre las estrellas de moléculas tan complejas como los fullerenos y los grafenos, la presencia de agua en muy diversas circunstancias astrofísicas, y la detección de algunas moléculas de tipo prebiótico (alcoholes y azúcares simples e incluso quizás la glicina), todo parece indicar que los procesos físicos fundamentales para originar vida podrían ser extremadamente comunes, lo que sugeriría que podría crearse vida de manera generalizada en el Universo.

La pregunta que surge entonces de manera inmediata es ¿Cuál es el método más adecuado para buscar vida extraterrestre? Quizás una primera respuesta sea que, dado que el agua líquida es indispensable para que la vida (tal y como la conocemos) prospere, tenemos que buscar cuerpos con las condiciones físicas precisas para que puedan mantener agua en estado líquido. Esto impone unas condiciones muy restrictivas de presión y temperatura que, en el Sistema Solar, conducen hacia los planetas rocosos (Marte) o a zonas interiores de algunos satélites (Titán, Europa, Encélado) de los planetas exteriores.

Encontrada el agua líquida, algunos diagnósticos químicos pueden resultar de gran ayuda a la hora de identificar vida. Por ejemplo, en la materia viva predomina la quiralidad química levógira (al igual que en los meteoritos), y la razón isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ del carbono tiene un valor de 91, ligeramente superior al valor de 89 medido en la materia inerte de la Tierra.

La esperanza de encontrar vida en nuestro Sistema Solar no es nula, pero es relativamente limitada. Resulta sumamente interesante estudiar otros astros, y para ello es preciso ir más allá de nuestro Sistema Solar. Al fin y al cabo, el nuestro es un sistema planetario en una estrella de las 100.000 a 400.000 millones que conforman nuestra Galaxia. Igual que nuestro Sol está acompañado por sus planetas, cabe esperar que al menos una buena fracción del enorme número de estrellas de la Vía Láctea también lleve asociado un sistema planetario más o menos similar al nuestro.

De hecho este ha sido uno de los resultados más relevantes y espectaculares de la Astronomía contemporánea: cientos de planetas están siendo descubiertos en torno a estrellas de características muy diversas. Esta apasionante serie de hallazgos comenzó en 1992 cuando, utilizando el gran radiotelescopio de Arecibo, el astrónomo polaco Alexander Wolszczan detectó dos planetas en torno al pulsar PSR B1257+12, a casi 1000 años luz de la Tierra. En 1995 los astrónomos Michel Mayor y Didier Queloz anunciaron la detección de 51 Pegasi b, un exoplaneta que orbita en torno a una estrella de tipo solar a 50 años

luz de la Tierra. Se conocen hoy unos 700 planetas extrasolares contenidos en unos 500 sistemas planetarios, y el telescopio Kepler de la NASA ha elaborado una lista que ya contiene más de dos mil candidatos adicionales. Uno de los resultados más sorprendentes de estas investigaciones es que prácticamente todos los tipos de estrellas (grandes o pequeñas, calientes o frías, jóvenes o viejas) parecen estar acompañadas por un cortejo más o menos numeroso de planetas. Naturalmente, la detección de tales planetas extrasolares tiene consecuencias inmediatas sobre nuestras concepciones acerca de la posible existencia de vida fuera de la Tierra.

Es cierto que entre los planetas detectados abundan los que son significativamente más masivos que la Tierra, pero la instrumentación que está siendo específicamente diseñada para la búsqueda de planetas de tipo terrestre, debería conducir en breve a la detección de otras Tierras. Hay varios proyectos desarrollándose para continuar observando planetas desde el espacio. La NASA tiene previsto el denominado Terrestrial Planet Finder y la ESA ha proyectado el observatorio Darwin. Ambos están siendo diseñados para incluir varios telescopios que realizarán observaciones de interferometría, de esta manera se espera poder obtener buenas imágenes de los sistemas planetarios más cercanos a la Tierra. Sin embargo, ninguno de estos dos observatorios será puesto en órbita antes del año 2016.

Además de la imagen directa, los estudios espectroscópicos de los planetas de tipo terrestre también revisten un gran interés. Tales estudios pueden permitir la detección de agua, ozono, dióxido de carbono y de otros compuestos relacionados con la vida en las atmósferas planetarias. La posible detección de cantidades substanciales de tales gases en uno de estos planetas sería un indicio de que contiene vida. Quizás un día también se pueda medir la razón isotópica del carbono y la quiralidad de la materia presente en esos planetas. No parece imposible que tales estudios, dentro de unas pocas décadas, puedan ofrecernos indicios que nos señalen la presencia de vida en esos mundos.

4. LA NUEVA FÍSICA

Un aspecto sorprendente de la Cosmología contemporánea es que unos modelos geométricos relativamente simples, como son los de la Gran Explosión, explican numerosos datos observacionales con éxito. Sin embargo, es importante señalar que, para llegar al Universo en expansión que observamos hoy, es necesario partir de unas condiciones iniciales muy precisas: el Universo primordial debía tener una densidad similar en todas las posiciones del espacio, pero con pequeñas irregularidades que pudieron crecer para formar las galaxias. También parece inevitable haber pasado por una época de expansión inflacionaria.

Además no se puede olvidar que los modelos de Gran Explosión reposan sobre dos teorías -la Relatividad general y la Mecánica cuántica- que, aunque tienen un éxito indiscutible en cada uno de sus ámbitos respectivos, no encajan perfectamente entre ellas. Llevamos varias décadas buscando una teoría universal en la que la Relatividad y la Física cuántica se admitan como aproximaciones válidas en unos rangos relevantes de parámetros físicos. La “teoría M”, a la que se refiere Stephen Hawking en su último y afamado libro (“The Grand Design”) y conceptos como “supercuerdas” o como “cosmología cuántica”, no son por el momento, más que prometedoras ideas que deben ser formuladas con precisión, especulaciones que necesitan formalizarse antes de alcanzar el rango de esa ansiada “teoría del todo” que debería dar un fundamento físico preciso a la Gran Explosión.

Como el término “teoría del todo” me resulta demasiado pretencioso, prefiero referirme con el de “nueva Física” a los intentos que buscan unificar la gravitación con las otras tres interacciones (electromagnética, débil y fuerte). Esta nueva Física también debe enfrentarse al reto de comprender algunas observaciones cruciales que no encuentran una explicación completamente satisfactoria (y en algunos casos, simplemente no encuentran ninguna explicación) en el marco de la teoría cosmológica estándar. Señalaré aquí las cuestiones abiertas que unánimemente se consideran como de primordial importancia.

La causa de la asimetría entre materia y antimateria sigue siendo uno de los mayores misterios de la Física. Lejos de aclarar el misterio, su relación

con el sentido de la flecha de tiempo (establecida por el teorema de la conservación de la simetría CPT) hace el problema más enigmático si cabe. Andrej Sajarov (1921-1989) especuló con la posibilidad de un segundo Universo reflejo espacial del nuestro, compuesto de antimateria, y en el que el tiempo fluyese en sentido contrario. Tal Universo se comunicaría con el nuestro mediante puentes que unen los agujeros negros de un Universo a los “manantiales blancos” del otro, ideas que encuentran su desarrollo en la teoría de los agujeros de gusano (también denominados “puentes de Einstein-Rose”). Aunque muy estimulantes, estas ideas resultan aún hoy sumamente especulativas y las causas para la dominación de la materia sobre la antimateria siguen sin comprenderse.

La materia oscura es el ingrediente principal de todas las galaxias, pero su naturaleza (junto con el de la energía oscura) sigue siendo otro de los misterios de la Física contemporánea. Aunque la materia oscura nunca ha sido observada de manera directa, su existencia resulta imprescindible para que las estrellas se mantengan agrupadas en una galaxia o para que las galaxias permanezcan asociadas en cúmulos. Las observaciones astronómicas indican que casi una cuarta parte del Universo actual está constituido por esta materia oscura. En las galaxias enanas, la materia oscura puede llegar a constituir el 99 % de su masa total. Aunque nadie sabe a ciencia cierta qué es la materia oscura, la opinión generalizada es que está constituida por partículas, más o menos exóticas, que están sujetas a la fuerza de la gravedad y que tienen poca agitación térmica, por eso se suele hablar de ‘materia oscura fría’. Entre las hipótesis más extendidas destacan las que consideran cuerpos astronómicos pequeños y/o fríos (p. ej. estrellas enanas, planetas o nubes gaseosas) y las que contemplan partículas elementales (neutrinos, partículas masivas débilmente interactivas o WIMPS, axiones, etc.). Un candidato que parece excelente es la partícula supersimétrica más ligera, que aún no se ha puesto de manifiesto en los colisionadores.

La energía oscura se puso experimentalmente de manifiesto en el año 1998, cuando dos equipos independientes llegaron a la misma conclusión sobre la expansión acelerada del Universo. Uno de ellos era el dirigido por Saul Perlmutter, preocupado por el asunto desde 1988. El otro equipo, coordinado por Brian Schmidt y Adam Riess, había comenzado a trabajar en ello en 1994. Ambos grupos compitieron para localizar las supernovas de tipo Ia más distantes, lo que les permitió medir con gran precisión la expansión del Universo. Su trabajo mereció el Premio Nobel de Física del año 2011. La

sorprendente aceleración que encontraron se interpreta en términos de una forma de energía que actúa como fuerza repulsiva entre las galaxias. Esta “energía oscura” constituiría el 74 % del Universo, pasando a ser su ingrediente más importante; se relaciona a veces con la energía del vacío postulada por la Mecánica cuántica. Sin embargo, esta última superaría a la energía oscura en más de 100 órdenes de magnitud. Conviene señalar que el término “energía oscura” no tiene porqué referirse necesariamente a una nueva forma de energía. Podría suceder que el fenómeno de aceleración observado se debiese a algún fenómeno o ley física nueva (o a alguna corrección de alguna ley ya conocida) que debería encontrar su lugar en el marco de la nueva Física.

No me cabe duda de que las pruebas experimentales de esta nueva Física requerirán de medidas en el espacio, pues es sólo ahí donde pueden encontrarse los enormes campos gravitatorios (cerca de los agujeros negros) capaces de poner de manifiesto algunas de las predicciones más sutiles. Otras medidas requieren relojes de altísima precisión, y sin perturbaciones apreciables, en los que pueda medirse el comportamiento predicho por la Relatividad general. Por otra parte, aunque la instrumentación en tierra de Física de partículas es cada vez más potente, los niveles de energía por partícula que pueden observarse en el Universo primordial están muchos órdenes de magnitud por encima de los alcanzados actualmente en el acelerador más potente (el Gran Colisionador de Hadrones del CERN en Ginebra).

Es evidente que las medidas astronómicas y, en particular, las realizadas desde el espacio están llamadas a jugar un papel decisivo no solo en la comprensión del origen y evolución del Universo, sino en el establecimiento de esa “nueva Física” o “teoría del todo”, que es uno de los Santos Griaes de la Ciencia contemporánea.

5. ASTRONOMÍA Y TECNOLOGÍA

La Astronomía es una Ciencia extremadamente exigente con la precisión de sus observaciones y sus cálculos. Cada avance en precisión en las medidas o en los modelos teóricos, ha generado nuevos descubrimientos. La utilización científica del primer telescopio permitió a Galileo obtener mapas de la Luna, descubrir los satélites de Júpiter, etc. El telescopio newtoniano permitió a Herschel descubrir Urano. Las mejoras introducidas por Jesse Ramsden (1735-1800) y Joseph von Fraunhofer (1787-1826) en los telescopios permitieron a Fridrich Bessel (1784-1846) y Wilhelm Struve (1793-1864) medir las primeras distancias estelares ofreciendo una imagen de la vastedad de la Galaxia. El telescopio espacial Hubble permitió hace diez años medir la expansión acelerada del Universo constatando así la importancia de la energía oscura, etc.

El desarrollo científico de la Astronomía está pues inextricablemente ligado al desarrollo de diferentes técnicas. Pero antes de entrar en el tema concreto de la estrecha relación de la Astronomía con las técnicas y la Tecnología conviene esclarecer cuáles son la naturaleza y el objeto de estos términos tan próximos. Interesa distinguir entre sus significados que se entrecruzan y que son como vasos comunicantes que se intercambian contenidos de manera pronta y eficaz.

Para las técnicas correspondientes a diferentes actividades parece apropiado utilizar la definición dada por Max Weber (1864-1920) en su obra *Economie et Société*: “la técnica de una actividad es la suma de los medios necesarios para su ejercicio, por oposición al sentido o al objeto de la actividad en sí que, en última instancia, determina (hablando concretamente) la orientación. La técnica racional es, por tanto, la puesta en funcionamiento de medios orientados intencional y metódicamente en función de experiencias, de reflexiones y –llevando al límite la racionalidad- de consideraciones científicas”.

Según estas reflexiones de Weber, se puede hablar de técnica siempre que haya una actividad con un grado suficiente de elaboración como para poder distinguir el objeto de la actividad de los medios necesarios para alcanzar ese fin. Por ello, Weber añade que se puede hablar de una técnica de la oración, de

una técnica de la reflexión y de la investigación, de una mnemotécnica, de una técnica pedagógica, de una técnica de la dominación política y jerárquica, de una técnica de la guerra, de una técnica musical, de la técnica de un escultor o de un pintor, de técnica jurídica, etc., y todas ellas son “susceptibles de un grado de racionalidad excepcional”.

En consecuencia nos podemos referir a las técnicas de la Astronomía, como a los medios empleados por innumerables artesanos a lo largo de la historia y a lo ancho de todo nuestro planeta para alcanzar los logros de nuestra disciplina, esto es, para el estudio de nuestro Universo. Se trata pues de prácticas metodológicas que se derivan de un dominio puramente intelectual, y que han llevado a la construcción de los grandes observatorios de las civilizaciones antiguas, al desarrollo del telescopio a lo largo de los últimos cuatro siglos, y a los inventos de detectores para el rango completo de frecuencias del espectro electromagnético llevados a cabo en el curso de los últimos cien años.

Entonces, ¿qué se entiende por Tecnología? Por un lado, se denomina Tecnología a la aplicación de la Ciencia a las técnicas; en cuyo caso, la Tecnología no es más que una Ciencia aplicada que podría pues estudiarse como otra de las Ciencias. Pero, por otra parte, ya en 1977, J. Beckmann había definido la Tecnología como “el estudio sistemático y racional de los procedimientos técnicos”, por lo que la Tecnología pasa a ser la disciplina que tiene por objeto de estudio las técnicas.

En el caso de la Astronomía no nos cabe duda de que algunas de las técnicas que le son propias (por ejemplo, la construcción de instrumentos ópticos) han sido desarrolladas de manera tan científica que han acabado dando lugar a una auténtica Tecnología. Aquí la Tecnología, siendo una Ciencia aplicada, se sitúa entre la Ciencia básica y las técnicas, produciéndose una interpenetración mutua entre los tres conceptos. En Astronomía, resulta particularmente claro el dicho de que “no puede haber Ciencia aplicada si no hay una Ciencia básica para aplicar”, según las acertadas palabras del Nobel Bernardo Housay (1887-1971).

Cuando el astrónomo expresa la necesidad de un instrumento para llevar a cabo un experimento, plantea un reto técnico que lleva al desarrollo práctico de un aparato. Y recíprocamente, una vez que una nueva técnica ha sido desarrollada para la observación astronómica, el hombre no ha tardado en aplicarla a otras Ciencias o en mejoras para la vida cotidiana. Tal desarrollo puede incidir, como lo demuestran diversos casos en la Historia, en el desarrollo tecnológico de una manera eficaz y, lo que es más notable, dichos desarrollos

tecnológicos pueden entonces ser de utilidad en muchos otros dominios de la actividad humana.

Pero sería absurdo suponer que el desarrollo de las técnicas se encuentra subordinado sistemáticamente al desarrollo de las Ciencias. En su *Historia General de las técnicas* escribe Maurice Daumas. “Incluso en nuestra época, las técnicas no son simplemente aplicaciones científicas, y las Ciencias, en el curso de los siglos precedentes, han recibido mucho de las técnicas, como lo reciben aún en nuestros días.”

Cita Daumas varios ejemplos de técnicas sofisticadas que han ido por delante de la teoría: la grabación de sonidos ha precedido al desarrollo de la electroacústica y los primeros aviones han volado antes del nacimiento de una aerodinámica científica. En Astronomía se podrían citar numerosos ejemplos: recordemos cómo la técnica del vidrio ha permitido la construcción de telescopios cada vez más precisos y menos sometidos a aberraciones ópticas, cuando la Óptica física aun no estaba desarrollada y tan sólo se disponía de la Óptica geométrica como disciplina científica de referencia para los numerosos inventos instrumentales. La Astronomía ilustra de manera particularmente clara la productividad de los transvases de conocimiento entre la Ciencia pura, la Tecnología y, como tanto gusta mencionar ahora, la Innovación.

En un artículo de la revista *Nature*, dice Hower Adkins que “la investigación básica consiste en disparar flechas al aire y, cuando caen en tierra, pintar una diana en el punto de aterrizaje”. La Astronomía dispara en la dirección de muchas técnicas tratando continuamente de optimizar la precisión de las observaciones, y la Tecnología resultante alcanza su máximo desarrollo en aplicaciones que contribuyen a la mejora del bienestar social.

Así los relojes desarrollados por los astrónomos en los siglos XVII y XVIII repercutieron inmediatamente en las técnicas de navegación y, aún hoy, las técnicas de la Mecánica celeste siguen siendo indispensables para la navegación aérea y espacial. Las técnicas de reconstrucción desarrolladas en la interferometría astronómica de ondas de radio se han aplicado en la tomografía axial computarizada (TAC) para obtener imágenes en tres dimensiones del cuerpo humano. Estas mismas técnicas se utilizan hoy para el emplazamiento ultrapreciso de un punto sobre el globo terráqueo (con 1 mm de precisión) y en la tomografía sísmica para la obtención de los parámetros y la estructura en velocidades de los terremotos. Otro ejemplo sobresaliente de técnica desarrollada y perfeccionada en Astronomía es la de la fotografía digital; en efecto, las cámaras digitales basadas en dispositivos de carga acoplada (CCD por sus

siglas en inglés) desarrolladas para la Astronomía en los años 1980 han invadido hoy nuestra actividad cotidiana.

La Tecnología y sus técnicas se utilizan en todos los ámbitos de la vida diaria realizando así una contribución manifiesta al progreso social. Como dijo el Dr. López Mateos, en su ingreso a esta docta institución, "...la técnica ha contribuido más que ninguna otra actividad a elevar el nivel de vida de la Humanidad aumentando su capacidad de consumo y haciendo más digno su trabajo". O, en palabras de Henry Ford (1863-1947), "el verdadero progreso es el que pone la Tecnología al alcance de todos".

6. ASTRONOMÍA EN ESPAÑA

Al igual que en las otras Ciencias, nuestro país ha mantenido actividad en Astronomía, a veces con gran éxito, a lo largo de su historia. Es muy posible que el momento histórico más brillante de la Astronomía española haya tenido lugar en Al Andalus, concretamente en el siglo XI, cuando Azarquiel (ca. 1029-1087) en Toledo desarrolló el innovador astrolabio conocido como azafea y compiló unas tablas astronómicas de gran calidad que fueron continuadas bajo el mecenazgo de Alfonso X el Sabio (1221-1284) con las observaciones llevadas a cabo por los astrónomos Yehuda ben Moshe e Isaac ben Sid en el decenio 1262-1272. De tal revisión resultaron las célebres tablas alfonsíes que se propagaron por toda Europa manteniéndose en uso hasta el Renacimiento. Parece plausible que estas tablas (quizás en alguna forma traducida y aún más revisada) llegasen a las manos del propio Copérnico y que, por su elevada precisión, afianzasen (o incluso desencadenasen) en el astrónomo polaco la idea del modelo heliocéntrico.

Hay que esperar hasta la Ilustración para encontrar en España un renovado interés por la Astronomía. La importancia de la navegación para el mantenimiento de las colonias necesitaba de conocimientos actualizados en Astronomía de posición, y fue esta necesidad la que llevó a la fundación del Real Observatorio de Cádiz en 1753 (institución que fue trasladada posteriormente a San Fernando). El marino Jorge Juan y Santacilia (1713-1773) que había participado de manera muy activa, junto a Antonio de Ulloa, en la Expedición de La Condamine al actual Ecuador, fue el artífice tanto de este observatorio como del Observatorio Astronómico de Madrid fundado en 1790. Aunque después de sufrir numerosas reorganizaciones y transformaciones, ambas instituciones han llegado hasta nuestros días.

Desde finales del siglo XVIII hasta mediados del XX; la historia de la Astronomía española es una sucesión de aciertos y desaciertos; a cortos periodos de florecimiento suceden largos periodos en los que impera la despreocupación de las autoridades. Los escasos astrónomos que consiguen destacar no logran crear escuela y los observatorios no despegan. Habría que esperar hasta los años 1970 para que los hechos se precipitasen.

En 1972 la Comisión Nacional de Astronomía, órgano encargado de asesorar al Gobierno en materia de Astronomía, firma un acuerdo con la Sociedad Max-Planck de Alemania para la instalación en la almeriense Sierra de los Filabres de un Centro Astronómico Hispano-Alemán que albergará cuatro telescopios alemanes y uno español. También en ese año, el Imperial College de Londres instala un telescopio de 1,55 metros de apertura en el Observatorio del Teide. La alta calidad de los cielos de Canarias lleva a la creación del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) en 1975 y a la firma, en 1979, de unos “Acuerdo Internacionales” que tienen por objeto la explotación científica de los observatorios astronómicos que se estaban desarrollando en el Teide y en el Roque de los Muchachos; junto con España, participaron en esos acuerdos los Gobiernos de Reino Unido, Suecia y Dinamarca, a los que a continuación se añadieron los de Francia, Alemania, Holanda e Italia.

El Consejo Superior de Investigaciones Científicas fundó en Granada su Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) en el año 1975 con la misión de construir y operar un observatorio óptico en Sierra Nevada. También en esa época, concretamente en 1977, la Agencia Espacial Europea (ESA) instala una estación para el seguimiento de sus satélites en Villafranca del Castillo (hoy convertida en ESAC, el Campus científico de la ESA). Por su parte la NASA tenía estaciones de seguimiento instaladas en el Complejo de Comunicaciones del Espacio Profundo de Madrid, en Robledo de Chavela, Cebreros y Fresnedillas de la Oliva.

Ya en 1982, el Institut de Radio-Astronomie Millimétrique (IRAM) instaló en Pico Veleta (Sierra Nevada) un radiotelescopio de 30 m de diámetro (además de un interferómetro en los Alpes franceses). Esta oportunidad facilitó la participación en el IRAM al Instituto Geográfico Nacional (IGN) que, a través del Observatorio Astronómico Nacional (OAN), había instalado un radiotelescopio de 14-m en Yebes (Guadalajara). El IGN se sumó como miembro de pleno derecho al IRAM en el año 1990, lo que permitió a los astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional participar en todas las actividades científico-técnicas del IRAM.

No cabe duda de que las actividades llevadas a cabo en los numerosos e importantes observatorios instalados en nuestro suelo actuaron como catalizador para la actividad nacional. Algunos de los astrónomos e ingenieros extranjeros se instalaron en España de manera permanente contribuyendo a la formación de jóvenes investigadores. Otros jóvenes partimos de España para realizar tesis doctorales en las instituciones nodrizas de los observatorios ins-

talados en nuestro suelo. El desarrollo experimentado por los institutos encontró su reflejo universitario a mediados de los 80, cuando los departamentos de las mayores Universidades nacionales crearon (o ampliaron) grupos propios de Astrofísica.

El panorama resultante comprende tres importantes centros de investigación (el IAC, el IAA y el OAN) acompañados por varios departamentos universitarios en los que comienza a desarrollarse cierta actividad en el desarrollo de tecnología. Contando con el apoyo de un decidido Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica (2000-2007), nuestra comunidad nacional, que cuenta hoy con unos 600 astrónomos profesionales, ha llegado a ser una de las más dinámicas del mundo. De ser meros usuarios de los telescopios extranjeros instalados en nuestro suelo, los astrónomos españoles han pasado a liderar dos grandes proyectos de instrumentación a nivel nacional: la construcción del Gran Telescopio de Canarias (GTC) y del gran Radiotelescopio de Yebes.

Este proceso culminó con la adhesión de España a la Organización Europea para la Investigación Astronómica en el Hemisferio Austral (ESO) en el año 2006. ESO, fundada en 1962 y contando actualmente con 14 estados miembros, es la organización que construye y mantiene las instalaciones de investigación en Astronomía de referencia mundial. Gracias a su participación en ESO, la comunidad nacional tiene a su disposición los telescopios más potentes del mundo, instalados en Chile. ESO se encuentra ahora construyendo ALMA, el observatorio más ambicioso de la historia de la Astronomía, y ejecutando las tareas preparatorias necesarias para la construcción del Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT), un telescopio óptico-infrarrojo, equipado con un espejo de unos 40 m de diámetro que será el más potente del mundo. España participa muy activamente en ambos proyectos.

Actualmente en España, la Astronomía es la disciplina científica que mayor porcentaje de publicaciones especializadas produce en revistas internacionales: un 7% de la producción mundial frente a algo menos del 4 % medio para todas las disciplinas. Pero más allá de las publicaciones, hay que destacar la importancia de los grupos que tienen capacidad tecnológica para diseñar, construir y mantener en funcionamiento instrumentación puntera en Astronomía a escala nacional. Este desarrollo de instrumentación astronómica ultrasensible es un motor importantísimo en el sistema de I+D+i, como lo reconocen los países más desarrollados del mundo.

Es importante destacar que los desarrollos tecnológicos efectuados en instituciones académicas españolas son transferidos a la industria nacional de

manera fluida. Actualmente, España cuenta con un buen número de empresas que han ganado experiencia en la construcción del GTC, del Radiotelescopio de Yebes, y en proyectos de astronomía espacial, y que optan de manera muy activa a grandes contratos de otros observatorios extranjeros e internacionales. Por ejemplo, en la construcción de ALMA empresas españolas han construido la estructura de acero de las 25 antenas europeas, la estación de producción de energía eléctrica, los amplificadores ultrasensibles (de tipo HEMT) que van instalados en todos los receptores construidos en Europa, varios elementos de los osciladores locales y de los sistemas de calibración, además de software y de otros componentes de alta tecnología. Estos contratos han alcanzado un total de más de 20 Millones de Euros para la empresa española. También, en los trabajos preparatorios del E-ELT, la empresa española está participando activamente, preparándose para el momento en que se oferten los contratos para los trabajos de construcción del telescopio.

A este espectacular desarrollo de la Astronomía ha contribuido de manera decisiva el compromiso de los sucesivos gobiernos que han visto las oportunidades científicas y tecnológicas ofrecidas por nuestra disciplina. Nuestra historia nos enseña que es importante que la brillante actividad actual no se detenga, que los gobiernos sigan apoyando estos desarrollos que revierten de manera, quizás no inmediata, pero sí segura, en dotar a nuestro país de unas capacidades que lo hacen más rico, más independiente y más influyente. No voy a insistir aquí en el clamor unánime de los científicos solicitando que la Ciencia sea una cuestión de Estado que se sitúe más allá de los intereses y veleidades de los partidos políticos.

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Es cierto que en muchos de los grandes proyectos a los que me he referido, la colosal y costosa instrumentación parece ocultar el papel jugado en la historia por los científicos. La denominada “Gran Ciencia” parece utilizar técnicas propias de la pesca masiva de arrastre, mediante la que ningún resultado podrá escapar de las enormes redes que capturarán todo lo que encuentren a su paso. Sin embargo, yo creo que el papel del investigador es insustituible, tanto para diseñar los grandes instrumentos como para alcanzar resultados imprevistos pero de peculiar relevancia. La técnica de la pesca con caña y señuelo practicada por grupos de investigadores, puede aún reportar grandes resultados a los científicos que la utilicen como un arte. Esta “Pequeña Ciencia” puede llegar a ser revolucionaria, pues un descubrimiento crucial puede hacer tambalear un gran edificio. En el extremo, como decía Karl Popper (1902-1994), “la pequeña Ciencia puede destruir la grande”.

Un ejemplo obvio de esta “Pequeña Ciencia” ha sido el descubrimiento de los planetas extrasolares, que fue realizado por pequeños grupos de observadores utilizando una instrumentación muy modesta; las implicaciones de tal descubrimiento han tenido un alcance enorme y han conmocionado a la “Gran Ciencia”. Aunque muy incompletas, las estadísticas disponibles nos indican que en la Vía Láctea podría haber 100.000 millones de estrellas acompañadas por planetas y, como se ha visto, existe una alta probabilidad de que muchos de estos se encuentren en zonas habitables y de que, tanto éstos como otros situados en regiones más inhóspitas, posean satélites con condiciones adecuadas para albergar algún tipo de vida, quizás significativamente diferentes de la que nos resulta familiar en la Tierra.

Ciñéndonos a lo que conocemos, cabe esperar que la vida más abundante en el universo sea la microbiana. Parece que, tan sólo en nuestra Galaxia, pudiera haber millones de planetas con algún tipo de vida rudimentaria. Aunque la probabilidad de que la evolución de la vida a formas complejas fuese pequeña, parece concebible que hayan podido desarrollarse, o que puedan llegar a desarrollarse en el futuro, cientos o miles de civilizaciones en la Vía Láctea.

Estos temas hacen reflexionar sobre nuestro papel en el Cosmos y sobre nuestra relación con él.

En otro orden de cosas, refiriéndonos más a la Gran Ciencia, debemos destacar las perspectivas que se abren hacia el futuro con lo que hemos denominado aquí “nueva Física”. La Astronomía está en condiciones de contribuir de manera decisiva al desarrollo de esta disciplina, mientras que la exploración de las partículas elementales en los grandes aceleradores también realizará aportaciones decisivas. De esta manera, la exploración de los dos infinitos de Pascal (lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño) sigue siendo imprescindible para avanzar en conseguir una visión más detallada y unificada del Cosmos.

Confío en que mis argumentos y el desarrollo histórico de la actividad de la Astronomía les hayan convencido de la profunda imbricación de esta Ciencia con otras disciplinas y del papel que la Astronomía ha jugado siempre como eficaz motivación de los desarrollos tecnológicos y de innovación.

Resulta por todo ello importante que España siga participando en la gran aventura de la investigación astronómica. En estos tiempos de crisis económica, se deben redoblar los esfuerzos para seguir recogiendo frutos y no quedar al margen en la gran carrera del desarrollo científico y tecnológico.

La Ciencia de Galileo inspira el desarrollo de una concepción filosófica, siempre en un marco racionalista, de nuestro Cosmos y de nuestra relación con él. Que, como tan bellamente expresó Sagan, nosotros seamos “el medio que tiene el Cosmos para conocerse a sí mismo”. Asomarnos al abismo astronómico permite, mediante la observación de otros planetas, de otros soles, de otras galaxias más y más lejanas, profundizar en el conocimiento de nosotros mismos, de nuestra pequeñez y, simultáneamente, de la grandeza de nuestra concepción.

Podemos decir, parafraseando a Wilde, que resulta esperanzador poder mirar a las estrellas mientras estamos encadenados a nuestro pequeño planeta. La grandeza, la simetría y, en definitiva, la belleza del Cosmos son absolutamente sobrecogedoras. El hecho de que la mente del hombre pueda lograr consciencia de este fascinante Universo no puede ser gratuito. Aunque nos escape a la razón estricta, la intuición nos indica que este Cosmos debe tener un sentido.

Al estudio de este Cosmos, y a la promoción y difusión de su conocimiento racional seguiré dedicando todo mi empeño, ahora con la magnífica oportunidad que me ofrece esta Real Academia de los Doctores de España.

Haré todo lo que esté en mi inteligencia y con la mayor voluntad para hacerme digno del honor que Vds. me conceden al distinguirme con la medalla de esta institución que me acredita como uno de sus miembros. Me incorporo pues a las responsabilidades de académico de número con enorme ilusión, con un leal compromiso para contribuir a los nobles fines de tan ilustre Corporación, y con la indisimulada satisfacción que desencadena en mí tan distinguido reconocimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Adkins, H., 1984, *Nature* 312, 212
- Bachiller, R., 1996, *Bipolar Molecular Outflows from Young Stars and Protostars*. Annual Review of Astron. Astrophys. 34, 111
- Bachiller, R., 2009, *De Galileo a los telescopios espaciales*. Lunwerg.
- Bachiller, R., Cernicharo, J., 2006, *Science with ALMA. A new era of Astrophysics*. Springer.
- Bachiller, R.; Pérez Gutiérrez, M., Kumar, M.S.N.; Tafalla, M., 2001, *Astron. & Astrophys.* 372, 899
- Bally, J., Reipurth, B., 2006, *The Birth of Stars and Planets*. Cambridge University Press.
- Barcons, X.; Rodrigo, R., 2007, El espectacular auge de la Astronomía en España. ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura, CLXXXIII 727, 705
- Barrow-Green, J., 1997, *Poincaré and the three body problem*. AMS Bookstore. Providence RI.
- Bertout, C., 2003, *Naissance et évolution des systèmes planétaires*. Flammarion.
- Boss, A., 1998, *Looking for Earths: The Race to Find New Solar Systems*. John Wiley and Sons. Eds., New York
- Cernicharo, J., Bachiller, R., 2012, *The Molecular Universe*. Cambridge University Press.
- Charbonneau, D., et al., 2000, *Astrophys. J.*, 529, L45
- Chavin et al., 2004, *Astron. and Astrophys.*, 425, L29
- Daumas, M., 1996, *Histoire générale des techniques*. Presses Universitaires de France
- Estébanez García, F., 1996, *Étimos griegos. Monemas básicos de léxico científico*. Octaedro. Nau llibres.
- Goffi, J.-Y., 1996, *La Philosophie de la Technique*. Presses Universitaires de France.
- Harrison, E., 2000, *Cosmology: the science of the universe*. Cambridge University Press
- Hawking, S., 2002, *El Universo en una cascara de nuez*. Ed. Crítica

- Hawking, S., Mlodinow, L., 2010, *The Grand Design*. Bantam
- Hoppe, P., Fujiya, W., Zinner, E., 2012, *Astrophys. J. Letters*, 745, L26
- Hoskin, M., 1997, *Illustrated History of Astronomy*. Cambridge University Press.
- Lachièze-Rey, M., 2005, *Initiation à la Cosmologie*. Dunod.
- Lamb, D., 2001, *The Search for Extraterrestrial Intelligence: A Philosophical Inquiry*. Routledge Eds.
- Lecourt, D. 2001. *La Philosophie des sciences*. Presses Universitaires de France.
- López Mateos, F. 1996. *Competitividad y Calidad, Objetivos Imprescindibles de la Industria Química*. Real Academia de Doctores de España.
- Mackay, A.L., 1992, *Diccionario de citas científicas. La cosecha de una mirada secreta*. Ediciones de la Torre.
- Mayor, M. and Frey, P.Y. 2001. *Les nouveaux mondes du cosmos*. Editions du Seuil, Paris
- Mayor, M., and Queloz, D. 1995, *Nature* 378, 355
- Nazé, Y., 2009, *L'astronomie des Anciens*. Belin - Pour la Science.
- Pascal, B., 1976, *Pensées*. GF Flammarion
- Peebles, P. J. E., 1993, *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press
- Ríos Insua, S., 2002, *El Análisis de Decisiones en Medicina*. Real Academia de Doctores de España.
- Rocamora García-Valls, P., 1995, *Ilustración y Librepensamiento*. Real Academia de Doctores de España.
- Smith, M.D., 2004, *The Origin of Stars*. Imperial College Press.
- Sparke, L.S., Gallagher, J.S., 2000, *Galaxies in the Universe*. Cambridge University Press.
- Todorov, T., 2006, *L'Esprit des Lumières*. Ed. Robert Laffont.
- Weber, M., 1971, *Economie et Société*, Ed. Pilon

DISCURSO DE CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. DR. D. FEDERICO LÓPEZ MATEOS

Excmo. Sr. Dr. Presidente de la Real Academia de Doctores de España,

Excmos. Señoras y Señores Doctores Académicos,

Señoras y Señores,

El diccionario de la Real Academia de la Lengua Española define a la **Astronomía** como *la Ciencia que trata de cuanto se refiere a los astros y, principalmente, a las leyes de sus movimientos* y cuando se refiere a la primitiva y mágica **Astrología** dice que es *la Ciencia de los astros que, en otro tiempo, se creyó que servía, también, para pronosticar los sucesos por la situación y aspecto de los planetas*. Y, así, hasta 22 términos relacionados con los **astros**.

La referencia a la antigüedad de estos estudios es manifiesta y su constancia en el desarrollo de la civilización, sucintamente trazada por el doctor Bachiller, muestra la preocupación de los sabios y los científicos de todos los tiempos por el conocimiento del entorno de la Tierra que, en principio, denominaban **Firmamento** y ahora alcanza a lo que conocemos como el **Cosmos**, el Universo, y se refiere a la **Cosmología** que quiere abarcar *el conocimiento filosófico de las leyes generales que rigen el Mundo Físico*, la Nueva Física, y que, de momento, sitúa sus límites observables a 46.600 millones de años-luz de la Tierra, 441 miles de trillones de kilómetros (441×10^{21} km).

El recorrido de esta trayectoria del conocimiento del Universo, que es consustancial con el desarrollo intelectual de la persona humana, tiene su semilla en la perenne inquietud por saber de dónde venimos, a dónde vamos y dónde estamos. Las respuestas, a través de los tiempos, han pasado, al principio, por la imaginación de los observadores y las interpretaciones teocráticas y filosóficas de los pensadores; después, materializándose con los datos aportados con la ayuda de los primitivos telescopios y la razonada intuición de los físicos y matemáticos de la época, hasta llegar al empleo de los más sofisticados instrumentos de investigación que hoy permiten ampliar el ángulo sólido y

penetrante de observación que proporciona datos experimentales precisos y rigurosos.

De Dios al Hombre, de la Ciencia a la Tecnología, retroalimentándose con sus razonamientos, los avances de las técnicas y los descubrimientos experimentales, la creciente espiral del Saber ha mantenido siempre en la actualidad científica a la Astronomía que es más que una Ciencia al uso, en la que todavía no se conoce su principio –aunque ya se nos dice que se puede afirmar lo que ha sucedido desde el 10^{-35} segundo del Big-Bang, de la gran explosión– y, con las cifras expuestas y la indefinición de los agujeros negros me parece que estamos muy lejos de saber su final cualitativo y cuantitativo.

Este puede ser un asunto multidisciplinar de permanente preocupación para los académicos de esta Real Academia por su interés espiritual y material y su trascendencia técnica y económica.

La eterna discusión sobre el origen de la Creación del Universo convoca a los teólogos, los filósofos y los profesionales de las Ciencias experimentales; el principio de la Vida y sus posibilidades en los astros necesita del concurso de los biólogos, los médicos, veterinarios y farmacéuticos; la exploración del espacio, necesita, por una parte, de la más avanzada Ingeniería; por otra, de un gran despliegue de recursos económicos y, en su conjunto, de estrategias políticas, reguladas por disposiciones legislativas que garanticen el progreso de la exploración del Cosmos desde la Tierra en concordia, tanto en la propiedad de los descubrimientos, en la programación, en los viajes espaciales como en la responsabilidad por las instalaciones de satélites y estaciones de apoyo y por la contaminación del espacio por la bautizada como *chatarra cósmica* que ya contabiliza en el espacio, desde 1957 cuando Rusia puso en órbita su primer satélite, más de 700.000 fragmentos de distinto tamaño que suponen un peligro para los astronautas y los satélites artificiales en activo. También la Arquitectura y Bellas Artes pueden encontrar fuentes de inspiración para el diseño de estructuras y para plasmar su sensibilidad en representaciones originales, bellas y profundas que estimulen la imaginación de los espectadores.

Pero si hay algo que me inquieta, como *lego absoluto* en el oficio de la Astronomía y la Cosmología –soy catedrático de Química Industrial– es el desconocimiento de la naturaleza de los **agujeros negros**, esos entes capaces de deformar el espacio-tiempo debido a su densidad tan elevada. Igualmente inquietantes me resultan la materia y la energía oscuras que, según he leído, ocupan el 95% frente al 5% de la materia y energía que ya se domina o, al

menos, se conoce. En otra ocasión, espero que el doctor Bachiller nos ilustre sobre estos temas.

Acabo mis reflexiones sobre el discurso de ingreso en esta Real Academia que acabamos de escuchar acusando recibo del mensaje sobre la **Astroquímica**, concretamente sobre la producción de dos compuestos singulares: el **fullereno** y el **grafeno**, formas alotrópicas que puede adoptar el carbono, junto al grafito y al diamante.

En una colaboración interdisciplinaria Robert E. Curl, Harold W. Kroto y Richard E. Smalley descubrieron las **buckybolas**, los **fullerenos**, moléculas constituidas por 60 átomos de carbono acopladas en forma esférica, como el un balón de fútbol, en el que los vértices de las piezas que lo constituyen —que son pentágonos y hexágonos— están ocupadas por los átomos de carbono.

Kroto, investigador de la Astronomía, se ocupaba del estudio de las moléculas ricas en carbono de las estrellas gigantes rojas mediante espectroscopía en la Universidad de Sussex (Reino Unido) y observó que contenían moléculas con largas cadenas de carbono y nitrógeno. Smalley y Curl en la Universidad de Rice preparaban agregados metálicos que podían ser útiles como semiconductores. Kroto fue de visita a Rice y sugirió a sus colegas químicos el cambio de los metales por carbono y como consecuencia aparecieron estructuras distintas que, después de mucho discutir, llegaron a la conclusión de que los átomos de carbono estaban dispuestos en forma de un icosaedro truncado constituido por 12 pentágonos y 20 hexágonos.

La producción de **fullereno** en el laboratorio, inicialmente complicada por la necesidad de altas temperaturas y presiones, se ha podido simplificar utilizando el arco eléctrico.

Por otra parte el **grafeno** descubierto y estudiado entre los años 2000 y 2005 resulta de aislar láminas de grafito constituidas por unidades hexagonales con el espesor de un solo átomo.

Ambos productos son los precursores de la **Nanotecnología** cuyo *padre* Richard Smalley falleció el 28 de octubre de 2005 a los 62 años de leucemia, después de haber recibido el premio Nobel de 1996, compartido con Curl y Kroto. Sus aplicaciones empiezan a salir al mercado como lubricantes, catalizadores y vehículos para la administración de fármacos. Pero donde se espera su aplicación masiva es en la fabricación de *nanotubos de carbono* para el cableado eléctrico cuya conductividad es 10 veces superior al cobre con un sexto de su peso, sin expansión térmica y con una resistencia a la tensión mayor que la del acero. El **grafeno**, por su parte, es el material que presenta el

menor espesor y el máximo desarrollo bidimensional, características básicas para la instalación de circuitos electrónicos acoplables a todos los aparatos de nuestra vida cotidiana.

¡Que amplia perspectiva panorámica de la Astronomía y la Cosmología en la Ciencia y en la Tecnología en el espacio y en el tiempo nos ha presentado nuestro inmediato académico! Su trayectoria en el periodo de formación, la definición de su vocación por la Astronomía, su producción investigadora y sus actividades profesionales fueron los avales por los que el 4 de junio de 2008 el Dr. D. Rafael Bachiller García recibió el título de Académico Correspondiente de esta, nuestra casa, después de presentar su discurso titulado “*Estrellas jóvenes en viejas galaxias*”.

Pero en el ritual de este acto, y con gran satisfacción por mi parte, corresponde recordar la vida académica, científica y profesional del que dentro de pocos minutos va a ser compañero como académico numerario.

El doctor D. Rafael Bachiller García nació en Madrid el 24 de febrero de 1957. Cursó dos especialidades de la Licenciatura de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense: Física Fundamental y Astrofísica. A sus 22 años fue distinguido con el Premio Extraordinario de la licenciatura.

Elaboró su tesis doctoral en la Universidad de Grenoble con la que alcanzó el Doctorado de Estado en 1985. Se doctoró, también en España, por la Universidad Complutense al año siguiente. En seguida se incorporó como Astrónomo de plantilla al Observatorio Astronómico Nacional de España, a la vez que participaba en la enseñanza de forma extraordinaria, en diversos periodos, como profesor asociado de la Universidad francesa Joseph Fourier.

Su carrera en el Observatorio Astronómico ha sido completa: primero desde su empleo como Jefe de Servicio del Observatorio; entre los años 1996 y 2000 fue responsable de la estación de Calar Alto; después entre el 2001 y 2002 fue Jefe del Área de Astronomía. En los últimos diez años dirige el Observatorio Astronómico Nacional, dentro de la estructura del Instituto Geográfico Nacional dependiente del Ministerio de Fomento.

Considerando esta trayectoria ¿se puede demostrar mejor la vocación por una profesión y la eficacia que le ha conducido hasta la responsabilidad que ahora ejerce?

Pero la actividad académica que a él le apasiona y a nosotros enorgullece es su investigación. Es especialista en formación estelar y las dos directrices complementarias de sus trabajos son: por una parte, la identificación de las estrellas más jóvenes, terreno en el que ha descubierto varias “protoestrellas de Clase

Cero” y ha caracterizado sus propiedades; por la otra, ha detectado y estudiado la componente neutra de las nebulosas planetarias, en las que ha identificado la presencia de una gran variedad de moléculas y ha estudiado la evolución química del gas neutro. Ambas líneas de trabajo le han proporcionado un amplio reconocimiento internacional en la vanguardia de los estudios sobre los “flujos bipolares” y sobre las teorías que, a partir de la década de los 90 del pasado siglo, tratan de explicar la evolución de las nebulosas planetarias.

Más de 250 publicaciones científicas en revistas internacionales de la literatura especializada recogidas en el *Science Citation Index* y capítulos íntegros en libros de difusión internacional sobre los fundamentos de la Formación Estelar dejan constancia de un quehacer intenso y laborioso.

Quiero destacar en esta reducida semblanza de su actividad investigadora la colaboración con diversos institutos extranjeros de Astronomía: en Francia, Alemania y Estados Unidos, donde se utilizan frecuentemente los radiotelescopios más potentes y sensibles del mundo, lo que le ha supuesto la incorporación y responsabilidad en varios proyectos de investigación, más que internacional, mundial, con una fuerte componente tecnológica multidisciplinar en la que se han de coordinar las actuaciones de equipos en los que participan de forma activa, tanto astrónomos como ingenieros de telecomunicación.

Su presencia en Congresos internacionales como participante activo es consecuente con su obra, los últimos han sido el de *Astroquímica de Estocolmo en 2006*, patrocinado por la fundación Nobel y los Científicos Mundiales “*Science with ALMA*” celebrado en Madrid, y “*The Molecular Universe*” en Toledo el año pasado.

Hasta aquí un somero y sintetizado repaso a la vida del doctor Bachiller. Perdóneme Rafael si no he sabido ser más generoso con tu obra, pero con lo dicho se satura mi satisfacción para que estés con nosotros.

Ser portavoz de la Real Academia de Doctores de España en un acto solemne en el que se reconoce la inteligencia y el trabajo de un profesional que sigue fielmente su vocación universitaria e incrementa sus saberes y proyección científica, honra al que ha tenido la oportunidad de conocer profundamente a la persona y a su obra.

Por eso, quiero dejar constancia de agradecimiento a mis compañeros Dres. Académicos de la Sección de Ciencias Experimentales y a la Junta de Gobierno de esta Real Academia que no dudaron al delegar en mí ese honor.

Rafael, la Real Academia de Doctores de España se siente orgullosa de tenerte entre nosotros en su más alto grado de consideración y afecto y, por

eso, te recibe con los atributos de doctor, que son orgullo y responsabilidad: el birrete para que sobresalgas de entre los demás y el libro de la sabiduría que nos acabas de abrir para acceder a los secretos de la Astronomía. Que tu estancia en esta Institución sea larga, fructífera y constante, consciente de la responsabilidad que hoy adquieres ante la Ciencia y ante España.

He dicho.

BIBLIOGRAFÍA

- TURNER, Michael S. EL ORIGEN DEL UNIVERSO. Investigación y Ciencia (pág.18) Noviembre 2009.
- SCHNEIDER, Peter. CUESTIONES FUNDAMENTALES DE COSMOLOGÍA. Investigación y Ciencia (pág. 60). Junio 2010.
- GONZÁLEZ CARMONA, J.; HERNÁNDEZ VOZMEDIANO, M.A.; GUINEA, F. ELECTRÓNICA DEL GRAFENO. Investigación y Ciencia (pág. 42) Septiembre 2010.
- FENG, Jonathan y TRODDEN, Mark. MUNDOS OSCUROS. Investigación y Ciencia (pág.14) Enero 2011.
- GEIM, André K. y KIM, Philip. GRAFENO. Investigación y Ciencia (pág. 54). Junio 2008.
- RENNIE, John; WALLICH, Paul y YAM, Philip. PREMIOS NOBEL 1996. Investigación y Ciencia (pág. 26). Enero 1997.
- TOHARIA, Manuel. VIDA FUERA DE LA TIERRA: ¿POSIBLE; PROBABLE; SEGURA? Estratos (pág. 52). Verano 2010.

