

EL DESCUBRIMIENTO DEL UNIVERSO EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX: DOSCIENTOS AÑOS DE AVANCES EN LAS OBSERVACIONES ASTRONÓMICAS

Francisco José GONZÁLEZ GONZÁLEZ
(Real Observatorio de la Armada, San Fernando)

RESUMEN: *Este breve trabajo intenta describir la evolución de la Astronomía y sus técnicas de observación a lo largo de los siglos XVIII y XIX. Se estudia el avance registrado en la Mecánica Celeste como consecuencia de las aportaciones de Newton, la introducción de nuevos instrumentos, el nacimiento de la Astrofísica y la aplicación de la Fotografía a las observaciones astronómicas y astrofísicas. Palabras clave: Astronomía, descubrimientos, siglos XVIII-XIX.*

ABSTRACT: *This short paper tries to describe the evolution of the Astronomy and its observational techniques during the XVIII and XIX centuries. The progress in Celestial Mechanics induced by Newton's works, the use of new instruments, the beginning of the Astrophysics and the application of the photography in astronomical and astrophysical observations are revised. Keywords: Astronomy, discoveries, eighteenth and nineteenth centuries.*

1.- La revolución astronómica. El desarrollo de las teorías newtonianas.

La ciencia moderna puso sus bases durante los siglos XVI y XVII. Los cambios producidos a lo largo de este periodo, en la forma de entender lo que hoy llamaríamos investigación científica, fueron consecuencia directa de la lucha entre el aristotelismo medieval preponderante y los principios que anunciaban a una nueva ciencia. Las viejas teorías científicas se vieron desbordadas durante este proceso, a raíz de la exigencia, cada vez mayor, de práctica y observación, sobre

todo en el campo de la astronomía y de la mecánica¹.

La astronomía ocupó un lugar privilegiado en el desarrollo de la llamada revolución científica. En el caso concreto de esta ciencia, podemos afirmar que la revolución se produjo, a pesar de que la astrología, pronosticadora de acontecimientos naturales y políticos, constituía la habitual ocupación de los astrónomos, y de que los motivos que inducían a apoyar los cambios (aparición de una nueva mentalidad favorable a la traducción y comprobación de los clásicos, influencia del pitagorismo y del platonismo en lo que se refiere a la relación entre matemáticas y realidad) eran mucho más vagos que la idea aristotélica del sentido común, partidaria de aceptar una Tierra inmóvil y un Sol que giraba a su alrededor².

El callejón sin salida en el que se encontraba la astronomía medieval, dominada por un sistema como el ptolemaico, que cada vez se hacía más insostenible, y su convencimiento de que el Universo, como obra divina, tenía que estar gobernado por leyes matemáticas simples y debía constituir una unidad armónica, llevaron a Nicolás Copérnico (1473-1543) a proponer un sistema astronómico con la Tierra, y los demás planetas, orbitando alrededor de un Sol situado en el centro. La aportación de Copérnico a la astronomía representó, pues, el primer paso de la revolución científica, un proceso que podríamos enmarcar entre 1543 y 1687, fechas de publicación de dos de las obras más importantes de la ciencia moderna: *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico y *Philosophiae naturalis principia mathematica* de Newton³. En el tiempo transcurrido entre las aportaciones de Copérnico y de Newton, tuvieron lugar los trabajos de personajes tan destacados para la estructuración de la astronomía moderna como Tycho Brahe, Kepler y Galileo⁴.

Galileo fue el introductor de los conceptos básicos de la ciencia moderna.

¹ Este fenómeno, conocido como la Revolución Científica, ha sido estudiado por numerosos autores y desde diversos puntos de vista. Nosotros hemos manejado, entre otras, las obras de A. Baig y M. Agustench, *La revolución científica de los siglos XVI y XVII* (Madrid, 1987), A. Elena, *A hombros de gigantes: Estudios sobre la primera revolución científica* (Madrid, 1989), J.M. López Piñero, V. Navarro y E. Portela, *La revolución científica* (Madrid, 1989) y C. Mínguez, *De Ockham a Newton: La formación de la ciencia moderna* (Madrid, 1986).

² Para situar los avances realizados en la astronomía dentro de la historia general de las ciencias, pueden ser consultadas las obras de A.C. Crombie, *Historia de la ciencia: De San Agustín a Galileo* (Madrid, 1983), S.F. Mason, *Historia de las ciencias* (Madrid, 1986) y la ya clásica de R. Taton (dir.), *Historia general de las ciencias* (Barcelona, 1973).

³ Ediciones originales de estos dos textos, y de otros muchos de interés para la historia de la ciencia, pueden ser consultados en la Biblioteca del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (Cádiz).

⁴ Las sucesivas aportaciones de estos personajes al proceso de desarrollo de la revolución astronómica han sido tratadas de una forma amena, y a la vez precisa, por C. Mínguez, *Op. cit.*

Aunque no alcanzó la genialidad innovadora y observacional de Copérnico, Brahe o Kepler, el uso del telescopio le permitió hacer descubrimientos y aducir argumentos que le apoyaban en su defensa del heliocentrismo y en el desarrollo de las bases de la mecánica. El profundo rechazo que mostraba por las leyes científicas aristotélicas fue uno de los aspectos más característicos de la postura de Galileo a favor de la teoría copernicana. Su concepción de la naturaleza, regida por relaciones de carácter matemático, afianzó una nueva idea mecánica de la realidad en la que no tenía cabida fin alguno. Toda su filosofía matemática estaba dirigida a combatir la filosofía del sentido común de los aristotélicos, que había sido la predominante durante muchos siglos. La principal novedad del método de trabajo empleado por Galileo consistió, pues, más que en la aplicación de una serie de reglas, en el establecimiento de un nuevo modo de entender la realidad.

El desarrollo de los conocimientos había sido tan grande durante los siglos XVI y XVII, que las investigaciones llevadas a cabo no pudieron ser más que superficiales. En esos años, los europeos se habían dedicado principalmente a descubrir nuevos continentes y a inspeccionar el mundo conocido. El paso hacia las investigaciones en profundidad, que conducirían a sorprendentes resultados en la mayoría de las ramas del conocimiento, vino marcado por las aportaciones de Newton al establecimiento definitivo de la ciencia moderna (formulación del método científico y publicación de la ley de la gravitación universal, que daba respuesta a las causas del movimiento de los planetas, a la naturaleza del desplazamiento de los cometas y al origen de las perturbaciones originarias del movimiento de precesión de los equinoccios)⁵. A partir del momento de la publicación de su teoría de la gravitación (1666), los principios de la filosofía aristotélico-escolástica comenzaron a ser entendidos como meras fantasías. Independientemente de todo ello, Newton fue el iniciador, junto a Leibniz, del estudio de los fundamentos del cálculo infinitesimal, descubrió el espectro solar y construyó el primer telescopio reflector, cuyo dispositivo de observación fue conocido como newtoniano.

La aplicación de las teorías de Newton a la astronomía, marcaría el punto de partida desde el que esta ciencia evolucionaría hacia el desarrollo de sus dos grandes vertientes en el siglo XVIII. Por un lado, una vertiente teórica, basada en el estudio de la mecánica celeste y en la aplicación a la astronomía de la nueva matemática newtoniana, necesaria para poder predecir la posición de los planos fundamentales (plano del ecuador y plano de la eclíptica) y de los astros del sistema solar, partiendo de los principios enunciados en la ley de la gravitación universal.

⁵ Sobre las contribuciones de Newton a la ciencia moderna, véase I.B. Cohen, *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas* (Madrid, 1983).

Por el otro, una vertiente práctica, caracterizada por la realización de un gran número de observaciones de precisión que tuviesen utilidad como punto de partida y de confrontación a las predicciones de la mecánica celeste⁶.

El impacto causado por la publicación de las teorías de Newton fue tal, que tuvieron que pasar bastantes años hasta que otros científicos se atreviesen a desarrollar algunos de los aspectos de la teoría de la gravitación universal. Tras un periodo de polémica y discusiones sobre su aceptación, tanto en Inglaterra como en el continente, aparecieron en Francia y Suiza los primeros estudiosos que aceptaron y desarrollaron las teorías newtonianas. Entre ellos podríamos citar a Alexis Claude Clairaut (1713-1765), Johann Bernoulli II (1710-1790) o Leonhard Euler (1707-1783). Utilizando el cálculo descubierto por Newton y Leibniz, y aplicándolo al análisis astronómico, estudiaron con detalle algunos temas que el científico inglés no había desarrollado completamente, por ejemplo, el problema de los tres cuerpos⁷. Poco más tarde, serían Lagrange (1736-1813) y Laplace (1749-1827) los que avanzarían en el análisis de la teoría newtoniana del sistema solar. Mientras que el primero de ellos contribuía decisivamente al desarrollo de la mecánica celeste, Laplace orientó sus trabajos hacia el estudio de las cuestiones cosmológicas, presentando un universo formado por un mecanismo perfectamente autorregulado, en el que las irregularidades se corregían entre sí⁸.

Podemos afirmar, por tanto, que, a principios del siglo XVIII, la mecánica celeste se había convertido en el banco de pruebas ideal para la comprobación de las teorías propuestas por Newton. La mayor parte de los enunciados de la nueva física estaba basada en problemas conceptuales referidos a casos ideales, es decir, exentos de rozamiento. Dado que su comprobación resultaba imposible, el movimiento de los cuerpos celestes, susceptible de ser medido con precisión, apareció entonces como la prueba definitiva de las nuevas leyes del movimiento y de la teoría de la gravitación universal.

La definitiva aceptación de los postulados newtonianos estuvo jalonada, durante la primera mitad del siglo XVIII, por una serie de controversias científicas que enfrentaron a partidarios y detractores de las nuevas teorías. Nos centraremos, a continuación, en la descripción de algunas de estas controversias, concretamente las relacionadas con las discusiones acerca de la forma de la Tierra, del movimiento de la Luna y de la vuelta del cometa Halley.

⁶ Véase, la obra de T.L. Hankins, *Ciencia e Ilustración* (Madrid, 1988).

⁷ En mecánica celeste se conoce como problema de los tres cuerpos al derivado del estudio de los movimientos esperables en tres cuerpos bajo la influencia de los campos gravitatorios de cada uno de los demás. Véase T.L. Hankins, *Op. cit.*

⁸ Para ampliar con detalle el desarrollo de la astronomía a lo largo del siglo XVIII, véase S.F. Mason, *Op. cit.*

Según lo propuesto por Newton, por efecto del movimiento de rotación, la Tierra debía estar achatada por los polos. Sin embargo, destacados miembros de la Academia de Ciencias de París, siguiendo a Descartes, pensaban que existía un aplanamiento por el ecuador. Como consecuencia de esta polémica, la citada Academia organizó dos expediciones científicas para medir el arco de meridiano, cuyos resultados debían permitir zanjar la disputa. La expediciones partieron hacia dos lugares bien distantes: Laponia, cerca del polo Norte, y Quito, junto al ecuador. La expedición a Laponia, dirigida por Pierre de Maupertuis (1698-1759), desarrolló sus trabajos entre 1736 y 1737 en el curso del río Tornea. La expedición destinada a Quito, dirigida por Louis Godin (1704-1760), trabajó entre 1735 y 1744 con la participación de dos marinos españoles, Jorge Juan y Antonio de Ulloa⁹. La comparación de los resultados de ambas expediciones confirmó la hipótesis de Newton sobre la figura de la Tierra, dando lugar a la primera comprobación experimental de sus teorías.

La segunda comprobación de la aplicación práctica de las teorías newtonianas se produjo a raíz de los intentos de predicción de los movimientos de la Luna. El conocimiento de las posiciones de nuestro satélite era de vital importancia, como veremos un poco más adelante, para la práctica de un método para determinar la longitud en alta mar. Sin embargo, lo errático de su movimiento llevó a afirmar a Newton que el cálculo de las posiciones de la Luna había sido el único problema que le había dado dolor de cabeza. Se trataba, en definitiva, del ya citado problema de los tres cuerpos. De ahí las perturbaciones de su órbita no explicadas hasta entonces, pues mientras los planetas son atraídos únicamente por el Sol, la Luna, además, es fuertemente atraída por la Tierra. De forma parecida a lo ocurrido en polémica surgida sobre la forma de la Tierra, serían algunos científicos franceses, en especial Clairaut, quienes, en un intento de demostrar las posibles correcciones de Newton, tuvieron que terminar por aceptar sus principales argumentos¹⁰.

La tercera gran comprobación de las teorías newtonianas se produjo a raíz de las predicciones efectuadas sobre el regreso del cometa descubierto en 1682 por Halley, del que también hablaremos un poco más adelante. El propio Halley había previsto la vuelta del citado cometa para 1758 o 1759. Las dificultades de Halley para realizar una predicción exacta se derivaban directamente del desconocimiento de los efectos perturbadores que la atracción de los grandes planetas podía causar en la órbita del cometa. De nuevo sería Clairaut el encargado de calcular con éxito

⁹ La participación española en esta expedición ha dado lugar al desarrollo de diversos trabajos en nuestro país sobre el tema. Véanse, al respecto, las obras de H. Capel, *Geografía y matemáticas en la España del siglo XVIII* (Barcelona, 1982), A. Lafuente y A.J. Delgado, *La geometrización de la Tierra* (Madrid, 1984) y A. Lafuente y A. Mazuecos, *Los caballeros del punto fijo* (Barcelona, 1987).

¹⁰ Véase, T.L. Hankins, *Op. cit.*

la fecha exacta del fenómeno, mediante la utilización de las nuevas teorías de la perturbación extraídas de los trabajos de Newton¹¹.

2.- La aportación de los astrónomos prácticos.

De todas formas, todas estas iniciativas teóricas y de demostración dependían directamente de la realización sistemática de observaciones astronómicas destinadas a establecer las posiciones exactas del mayor número posible de estrellas.

En lo que se refiere a las observaciones de precisión habría que señalar el trabajo de los astrónomos prácticos, entre los que podríamos encontrar desde los ricos ilustrados aficionados a la astronomía hasta los astrónomos profesionales del Observatorio de Greenwich. Todos contribuyeron al desarrollo de la gran tarea astronómica cuyas características se renovaron en el XVIII, la astrometría (obtención de medidas de posición de los cuerpos del sistema solar y de las estrellas zodiacales más brillantes)¹². El trabajo de catalogación precisa de los cielos registró importantes avances, gracias a mejoras como la determinación de todos los factores que pudiesen influir en el aspecto del fenómeno observado, y en la precisión de las observaciones, y la construcción de teorías capaces de tener en cuenta las principales causas de error. De esta forma, una vez bien determinadas las posiciones estelares, sería posible estudiar con detenimiento el movimiento de los planetas.

La elaboración de catálogos estelares precisos sustituyó, por tanto, a lo largo del siglo XVIII, a la de atlas celestes destinados a agrupar las estrellas en constelaciones zodiacales. Como ya hemos visto, era necesario establecer las posiciones de las estrellas según un sistema de coordenadas que permitiese a los astrónomos una buena orientación en la inmensidad del cielo observable. En este sentido se desarrollaron los trabajos de los principales astrónomos observacionales, como Flamsteed, Halley, Bradley y Herschel¹³.

Mientras que en Francia, como ya hemos visto, se desarrollaban los estudios teóricos en torno a la mecánica celeste y a la aplicación de las teorías de Newton, los astrónomos británicos centraron sus trabajos en las observaciones de precisión. La primera aportación de importancia se debe a John Flamsteed (1646-1720), primer astrónomo real del Observatorio de Greenwich y autor de la *Historia*

¹¹ Véase, T.L. Hankins, *Op. cit.*

¹² Véase el artículo de M.A. Sellés, "La astronomía en el siglo de las luces", publicado en *Tribuna de astronomía*, extra (1987), 48-59.

¹³ Las aportaciones a la astronomía observacional de personajes como Flamsteed, Halley, Bradley o Herschel, están muy bien descritas en R. Taton (dir.), *Op. cit.* y en M. López Arroyo, "La astronomía del siglo XVIII", en *La Expedición Malaspina (1789-1794)* (Madrid, 1984).

coelestis britannica (1725), obra en la que quedaron recogidas las observaciones de toda su vida y que incluyó un catálogo de más de 3000 estrellas.

El sustituto de Flamsteed al frente de Greenwich fue Edmond Halley (ca.1656-1743). Partiendo del postulado de Newton, según el cual los cometas debían describir órbitas periódicas, Halley calculó una tabla con los movimientos de 24 cometas. Esta tabla le permitió establecer que los cometas de 1531, 1607 y 1682 eran el mismo, de ahí su predicción de que volvería a ser observado en 1759. Aunque, como ya hemos visto, la fecha exacta de su reaparición fue calculada por Clairaut, el nombre de Halley quedaría perpetuado para siempre gracias a este descubrimiento.

Otro de los grandes astrónomos observacionales del siglo XVIII fue James Bradley (1693-1762), conocido por ser el descubridor del fenómeno conocido como la aberración de la luz (1728) y del movimiento de nutación (movimiento de oscilación del eje de rotación de la Tierra) (1748).

Por último, no podemos olvidar a William Herschel (1738-1822) que, además de destacar en la construcción de telescopios reflectores de grandes dimensiones, puso los cimientos de la astronomía estelar. Se dedicó durante años, mediante lo que él mismo llamaba "revistas celestes", al estudio sistemático de los movimientos y distribución de las estrellas. Gracias a estos trabajos intuyó la estructura de nuestra galaxia, la Vía Láctea, descubrió las estrellas dobles y catalogó unas 2500 nebulosas, a las que llamó "universos islas", adivinando su ubicación fuera de la galaxia. En el curso de una de sus sesiones de observación, realizada en 1781, localizó un cuerpo celeste que se movía entre las estrellas. Se trataba de Urano, el primer planeta descubierto en la era moderna.

El descubrimiento de Urano por Herschel, estimuló la búsqueda de nuevos planetas por los astrónomos, que comenzaron a trabajar basándose en la ley de Bode, una relación matemática enunciada en el siglo XVIII que establecía las distancias que debían separar a los planetas del Sol. Ello dió lugar al descubrimiento de Ceres (1801), el mayor de los asteroides, y del cinturón de pequeños planetas que tienen su órbita entre Marte y Júpiter. Mientras tanto, las tablas que se habían elaborado para predecir los movimientos orbitales de Urano comenzaron a dar problemas a los astrónomos, pues lo establecido en ellas no coincidía con el resultado de las observaciones. Esto podía deberse a dos causas bien distintas: o la ley de la gravitación universal de Newton no era exacta, o existía una masa desconocida que perturbaba el movimiento de Urano. La primera hipótesis, que ya había sido planteada sin éxito por Clairaut, a raíz de sus estudios sobre el movimiento de la Luna, fue rápidamente desechada. La segunda dió lugar al inicio de investigaciones independientes por J. C. Adams en Inglaterra y Le Verrier en Francia, dirigidas a la localización de un hipotético planeta que explicase el origen

de las perturbaciones constatadas en la órbita de Urano¹⁴.

Aunque el primero en establecer los elementos de la órbita del planeta fue Adams, las investigaciones realizadas en los observatorios de Greenwich y Cambridge, que contaban con sus resultados desde 1845, no fueron muy exhaustivas, de ahí que el descubrimiento del nuevo planeta, fuese asignado a Le Verrier quien, tras publicar sus cálculos sobre la órbita del planeta en agosto de 1846, consiguió que un mes después, J. Galle, astrónomo del Observatorio de Berlín, localizase en el cielo a Neptuno, el planeta desconocido hasta entonces.

3.- Las aplicaciones náuticas de la astronomía.

Una de las aplicaciones prácticas de la astronomía que más interés suscitó en las instituciones oficiales fue la derivada de la introducción y utilización de técnicas astronómicas en la navegación, cuyas mejoras en rapidez y seguridad tenían una incidencia directa en el óptimo aprovechamiento de las rutas transoceánicas. De todos es conocido que, para poder fijar la posición geográfica de un lugar cualquiera, es necesario determinar con exactitud la latitud y la longitud, que son las dos coordenadas que la definen. Desde un primer momento, el cálculo de la primera de estas coordenadas fue relativamente sencillo, puesto que, al coincidir la latitud de un lugar con la altura del polo celeste sobre el horizonte, observada desde ese mismo lugar, bastaba con obtener la altura de la estrella Polar para establecer su valor con suficiente precisión. Por el contrario, la determinación de la longitud siempre resultó bastante más complicada, pues para calcularla era necesario observar el mismo fenómeno celeste en dos puntos diferentes, y extraer la diferencia horaria entre ambas observaciones.

La determinación de la latitud en alta mar fue resuelta en el siglo XV por los navegantes portugueses. En esa época, los marinos lusitanos ya ponían en práctica un método de navegación basado en el cálculo de la latitud mediante la observación de la diferencia de alturas de los astros sobre el horizonte. El sistema empleado consistía en observar, antes de iniciar una travesía, la altura de la estrella Polar en una determinada posición de la esfera celeste, o bien la altura de una estrella a su paso por el meridiano. A lo largo del viaje, se volvía a tomar la altura de la misma estrella en idénticas circunstancias, y con ello se obtenía la diferencia en grados de dicha altura entre los dos lugares de observación. Transformando en leguas el valor de esta diferencia, se podía calcular la distancia que se había recorrido hacia el Sur o hacia el Norte. Como consecuencia de ello, y para poder obtener todo el rendimiento posible de estas prácticas astronómicas, astrónomos y navegantes se

¹⁴ Véase, R. Taton (dir.), *Op. cit.*

vieron obligados a colaborar en la mejora y adaptación a los barcos de los instrumentos de observación astronómica disponibles, de ahí el desarrollo y la posterior difusión de instrumentos como los astrolabios náuticos, las ballestillas y los cuadrantes¹⁵.

La determinación de la longitud era bastante más problemática, y se complicaba aún más cuando se trataba de hallarla desde un buque situado en alta mar. Durante casi toda la Edad Moderna, a pesar de ser ésta la época de los grandes viajes transoceánicos, los navegantes contaron con muy pocos medios para realizar una travesía oceánica segura (brújula, corredera, técnicas para la determinación de la latitud). A pesar de que la solución del problema de hallar la longitud de un punto desde un navío en alta mar había sido un objetivo de primera magnitud para muchos gobiernos desde fines del siglo XVI, hasta bien entrado el siglo XVIII los navegantes no pudieron contar con métodos fiables para su determinación. De todas formas, los nuevos métodos exigían de los marinos que quisieran llevarlos a la práctica unos conocimientos astronómicos y de cálculo poco habituales en los navegantes de la época.

Aunque fueron muchos los métodos propuestos para solucionar este problema desde el siglo XVI en adelante, casi todos ellos resultaron poco adecuados para su ejecución en alta mar. Las dos alternativas que, en el siglo XVIII, parecían más viables (la utilización de cronómetros marinos para conseguir un exacto cálculo de la diferencia horaria y el método de la observación de las distancias lunares) implicaban directamente una mejora de la formación astronómica de los marinos. De ahí que se pueda afirmar que astrónomos y navegantes ilustrados consiguieron introducir en la náutica nuevas técnicas astronómicas, esenciales para acabar con la inseguridad derivada de la navegación por estima. Todo ello, a pesar de que una gran parte de los marinos no veía con buenos ojos la necesidad de realizar complicados cálculos matemáticos¹⁶.

El método de los cronómetros se basaba en el siguiente principio: el buque debía partir con un reloj que marcara la hora del meridiano del punto de partida; ya en alta mar, mediante observaciones astronómicas, debía deducirse la hora local del punto donde se hallaba situado el barco; de esta forma, la diferencia entre esta hora y la marcada en el reloj, se traduciría directamente en la diferencia de longitud entre la posición de la nave y el punto de partida. Normalmente se considera que la más antigua propuesta sobre el uso de relojes en la solución del problema de la longitud está incluida en la obra de Gemma Frisius *De principiis astronomiae et*

¹⁵ Véase, F.J. González, *Astronomía y navegación en España. Siglos XVI-XVIII* (Madrid, 1992).

¹⁶ Véase, M. Sellés, "Astronomía y navegación", en M. Sellés, J.L. Peset y A. Lafuente, *Carlos III y la ciencia de la Ilustración* (Madrid, 1988), 81-98.

cosmografiae (Lovaina, 1530). Sin embargo, algunos autores coinciden en afirmar que fue Hernando Colón el autor de la primera propuesta de este método en 1524. A pesar de la simplicidad del procedimiento, tendrían que pasar muchos años hasta que la técnica relojera pudiese presentar unos aparatos capaces de ser utilizados en alta mar sin pérdida de precisión. En este sentido, no podemos olvidar las aportaciones de Huygens y Hooke a la construcción de relojes de precisión, realizadas a lo largo del siglo XVII, que sentaron las bases del desarrollo de la relojería de precisión en el siglo XVIII¹⁷.

La aplicación de este método comenzó a ser viable gracias al relojero inglés John Harrison, que en 1736 fue autorizado por el Board of Longitude (Oficina de Longitudes) para efectuar las pruebas de su cronómetro marino en un viaje de ida y vuelta entre Londres y Lisboa. Los buenos resultados obtenidos dieron lugar a una ayuda oficial para que Harrison construyese un nuevo reloj más perfeccionado. Unos años más tarde, Harrison conseguiría fabricar un cronómetro que, tras 81 días de prueba, sólo acumulaba un error de cinco segundos. En Francia, mientras tanto, también se realizaban intentos por conseguir cronómetros marinos fiables. En el último cuarto del siglo, tanto Pierre Le Roy como Ferdinand Berthoud, probarían unos relojes cuya precisión resultaba similar a la obtenida poco antes por Harrison¹⁸.

El método de la observación de las distancias lunares estaba basado en la utilización del desplazamiento de la Luna respecto a las estrellas como un cronómetro universal. La práctica de este método consistía deducir la diferencia de longitud entre dos puntos, comparando el lugar que debería ocupar la Luna en el punto de partida y aquel en el que realmente se encontraba. Para ello era necesario observar la distancia angular de la Luna a un astro de referencia y las alturas de ambos sobre el horizonte. Sin embargo, la necesidad de conocer con exactitud las posiciones estelares, la imposibilidad de predecir con mucho tiempo de antelación, y con la suficiente exactitud, los movimientos de la Luna y la inexistencia de instrumentos adecuados para realizar observaciones astronómicas precisas en alta mar, retrasaron durante mucho tiempo la puesta en práctica de este método, cuya primera descripción se encuentra en los comentarios a la traducción de la *Geografía* de Ptolomeo realizada en 1514 por Johann Werner¹⁹.

La práctica del método de las distancias lunares, basada como acabamos de ver en la medida de la distancia angular entre la Luna y determinadas estrellas, trajo

¹⁷ Véase, F.J. González, *Op. cit.*

¹⁸ Las pruebas a que fueron sometidos los cronómetros de Harrison y Berthoud están descritas con cierto detalle en A. Lafuente y M. Sellés, *El Observatorio de Cádiz (1753-1831)* (Madrid, 1988).

¹⁹ Véase, F.J. González, *Op. cit.*

como consecuencia la necesidad de fabricar unos instrumentos capaces de medir los ángulos necesarios con facilidad desde un buque en movimiento. Durante todo el siglo XVII, el instrumento más utilizado para determinar las alturas de los astros sobre el horizonte en alta mar fue el cuadrante de Davis. La aparición de los instrumentos de reflexión, pequeños y manejables instrumentos de observación astronómica, desarrollados especialmente para usos náuticos, no tuvo lugar hasta bien entrado el siglo XVIII. Estos serían los precursores del conocido sextante. El primero de ellos fue el octante de Hadley, un instrumento compuesto por un sector circular de 45° , cuyos radios estaban provistos de un anteojo y dos espejos. Mediante esta disposición, se conseguía reunir en una sola línea de mira los dos objetos, el astro y el horizonte, que el observador tenía que enfilar simultáneamente con instrumentos más antiguos como la ballestilla y el cuadrante de Davis.

El sector graduado del octante permitía medir alturas menores de 90° sin ningún problema. Sin embargo, la necesidad de medir mayores distancias angulares, surgida de la aplicación del método de las distancias lunares, hizo pensar a los constructores de este tipo de instrumentos en una serie de modificaciones que dieron lugar al nacimiento de dos nuevos aparatos, el quintante y el sextante. Este último, cuyo uso ha perdurado hasta nuestros días, se convirtió, a partir de la última parte del siglo XVIII, en el instrumento astronómico más utilizado en la navegación. El sextante está compuesto por un sector circular de 60° , provisto de un anteojo y dos espejos, que permite realizar con facilidad las observaciones destinadas a obtener la altura de los astros y la medición de ángulos menores de 120° . Gracias a estas características, el sextante fue considerado en el siglo XVIII como el instrumento ideal para las observaciones necesarias en la determinación de la longitud por medio del método de las distancias lunares²⁰.

4.- Los nuevos observatorios astronómicos.

La necesidad de intercambiar numerosas observaciones realizadas en diferentes lugares promovió en el siglo XVIII un importante esfuerzo por parte de los astrónomos prácticos en lo que a normalización de técnicas y objetivos se refiere. La aplicación de la astronomía, ciencia que en principio podía aparecer como abstracta, a cuestiones tan prácticas y de tanto interés político como la obtención precisa de coordenadas geográficas o la navegación astronómica fue acompañada por el interés de los estados europeos por el fomento de esta ciencia. Si a ello sumamos el importante empuje dado a las tareas astronómicas por parte de los gobiernos ilustrados encontraremos las bases de la rápida institucionalización de la

²⁰ Véase, F.J. González, *Op. cit.*

astronomía. Buena prueba de ello fueron los concursos convocados para conseguir una fórmula para la determinación de la longitud en el mar o las expediciones geodésicas financiadas por Francia para determinar la figura de la Tierra.

Durante el Siglo de las Luces la protección y financiación del estado iría sustituyendo, cada vez con más fuerza, al mecenazgo de reyes y nobles en la práctica de la astronomía. En el inicio de este proceso cabría destacar sin duda la fundación de los observatorios de Greenwich y de París, pioneros entre las instituciones astronómicas europeas. La creación de academias y el auge de las instituciones académicas, así como el interés particular de determinados ilustrados, trajo consigo un importante aumento del número de observatorios -unos 130 a fines del XVIII-, en los que los astrónomos se fueron profesionalizando hasta el punto de ir sustituyendo a los particulares, que hasta entonces habían estado haciendo aportaciones de importancia a la astronomía desde sus gabinetes.

Así pues, los aficionados a la astronomía tuvieron un papel cada vez menos importante, dada la imposibilidad de competir con los más precisos y complejos instrumentos de los observatorios y la mayor complejidad de los cálculos y métodos utilizados. Los aficionados a la astronomía vieron reducida su actividad a las posibilidades de sus instrumentos y conocimientos, válidos en observaciones para la determinación de posiciones geográficas o en observaciones de fenómenos astronómicos de carácter extraordinario o singular (eclipses, ocultaciones, etc.)²¹.

La creación del Observatorio de París tuvo lugar en 1667 y estuvo ligada directamente a la fundación de la Academia Real de Ciencias. El movimiento propicio a la organización e institucionalización de las investigaciones científicas, tras el importante desarrollo adquirido por éstas durante los años precedentes, impulsó a Luis XIV, y a su ministro Colbert, al apoyo de la creación de una academia que acogiese los trabajos de los principales científicos de la época. En ello influiría, sin duda, la corriente de opinión favorable a las investigaciones astronómicas, tanto en la mecánica celeste como en sus aplicaciones prácticas, sobre todo en la navegación. Para la dirección del Observatorio fue designado el astrónomo italiano Domenico Cassini. Durante esta primera etapa de la institución se llevaron a cabo los trabajos de Röemer (1644-1710) para la determinación de la velocidad de la luz (1675) y Picard (1620-1682) inició la publicación de las efemérides tituladas *Connnaissance des temps* (1679). La dirección del Observatorio iría pasando, a partir de entonces, de padres a hijos en la familia Cassini durante cuatro generaciones consecutivas, en las que imprimieron a los trabajos de la

²¹ Véase, M.A. Sellés, "La astronomía en el siglo de las luces", en *Tribuna de astronomía*, extra (1987).

institución una clara orientación geodésica²².

Por el contrario, los orígenes del primer observatorio inglés pueden ser situados en la polémica surgida en la ciencia del siglo XVII sobre los métodos para solucionar el problema del cálculo de la longitud en alta mar. La necesidad de contar con unas tablas precisas de posiciones de estrellas y de la Luna, para la práctica del método de las distancias lunares, llevó a la monarquía británica a promover la fundación en 1675 del Real Observatorio de Greenwich, que fue puesto a cargo de John Flamsteed. Su importante tarea observacional, de la que ya hemos hablado, fue la primera contribución de Greenwich a la astronomía. Sin embargo, la realización de estas primeras observaciones no fue un trabajo fácil. Habían sido hechas por Flamsteed con instrumentos particulares y pagándose sus propios ayudantes. A la muerte de Flamsteed, Edmond Halley fue la persona elegida para sustituirle, ya conocido por sus contribuciones a la astronomía y a la ciencia en general. Sin embargo, éste no sería el único astrónomo famoso que estuvo al frente del observatorio británico. Tras Halley dirigieron la institución personajes de la talla de James Bradley, descubridor del fenómeno de la aberración de la luz, y Nevil Maskeline, conocido por sus estudios sobre el cálculo de la longitud mediante el método de las distancias lunares y por la publicación del primer *Nautical Almanac* (1767). Sus trabajos y observaciones convirtieron al Observatorio de Greenwich a lo largo del siglo XVIII en la principal institución astronómica europea, sobre todo en lo que se refiere a la práctica observacional y a la elaboración de catálogos de posiciones de estrellas²³.

5.- El progreso de los instrumentos en los siglos XVIII y XIX.

Además de factores como el desarrollo de las nuevas teorías astronómicas o el inicio de programas sistemáticos de observación, también hemos de tener en cuenta, en relación con los avances registrados en la astronomía del siglo XVIII, las mejoras introducidas en la construcción de los instrumentos de observación. Durante la primera parte del siglo XVIII, el perfeccionamiento de las técnicas y de la mecánica de precisión, fenómeno que se produjo en Inglaterra con mayor intensidad, dió lugar al desarrollo de nuevos instrumentos científicos, dotados de una mayor precisión y fiabilidad. En el caso de los instrumentos relacionados con la astronomía, los años iniciales del XVIII dieron lugar al abandono de los aparatos

²² Sobre la fundación del Observatorio de París, véase el artículo de R. Taton, "Les origines et les débuts de l'Observatoire de Paris", publicado en *Vistas in astronomy*, 20 (1976), 65-71.

²³ Los orígenes y la historia del Real Observatorio de Greenwich han sido estudiados a fondo por E.G. Forbes, A.J. Meadows y D. Howse en la obra *Greenwich Observatory* (Londres, 1975).

tradicionales, que no habían conseguido superar la precisión alcanzada por el astrónomo danés Tycho Brahe, constructor en el siglo XVI de sus propios instrumentos de observación²⁴.

El siglo XVIII marcó una completa transformación en los métodos de construcción de instrumentos. Durante las primeras décadas, el progreso en la búsqueda de nuevas técnicas fue relativamente lento. Sin embargo, poco después, gracias a la actividad de personajes como George Graham y John Bird, Inglaterra llegaría a contar con un buen número de excelentes constructores de instrumentos, cuyos trabajos sentarían las bases de la evolución hacia los modernos métodos de construcción adoptados en los primeros años del siglo XIX. Entre los artistas ingleses especializados en la producción de instrumentos astronómicos y geodésicos a gran escala en el siglo XVIII, merecerían ser destacados, además de los citados Graham y Bird, personajes como Jeremiah Sisson, John Dollond, Peter Dollond, James Short y Jesse Ramsden. En Francia, durante esta misma época, trabajaron Langlois, Canivet, Lenoir, Mégnié y Fortin. Mientras tanto, en los demás países europeos lo normal era encontrar buenos artesanos dedicados a reproducir el trabajo de los fabricantes británicos, ya fuese usando como modelo los propios instrumentos adquiridos en Londres o los trabajos descriptivos publicados sobre ellos por sus mismos constructores²⁵.

Los astrónomos habían ideado ya en el XVII instrumentos como el cuarto de círculo mural (Tycho Brahe), el telescopio refractor (Galileo), el telescopio reflector (Newton), el péndulo de precisión (Huygens) o el instrumento de pasos (Röemer). Sin embargo, la posibilidad de aprovechar al máximo las ventajas de estos aparatos vendría dada por las aportaciones técnicas de los constructores de instrumentos. La especialización y profesionalización de los artesanos encargados de construir aparatos de precisión dio lugar, a lo largo del siglo de la Ilustración, a una sensible mejora de las características técnicas de los mecanismos sobre los que debían ir montados los aparatos, así como de los procedimientos dirigidos a perfeccionar aspectos tan importantes como el montaje de los micrómetros y de los hilos, el pulido de las lentes o la estabilidad de los aparatos. De ahí que se pueda afirmar, que, en aquellos años, la labor de los artesanos en la búsqueda de la precisión de las observaciones fue casi tan importante como la de los propios astrónomos.

²⁴ Sobre los avances registrados en la fabricación de los instrumentos, véanse las obras de J.A. Bennet, *The divided circle: A history of instruments for astronomy, navigation and surveying* (Oxford, 1987), A. Chapman, *Dividing the circle: The development of critical angular measurement in astronomy, 1500-1850* (Nueva York, 1990) y M. Daumas, *Scientific instruments of the seventeenth and eighteenth centuries* (Londres, 1972).

²⁵ Los talleres ingleses y franceses de construcción de aparatos científicos son objeto de estudio de dos de los capítulos de la ya citada obra de M. Daumas.

El perfeccionamiento de los instrumentos ópticos estuvo marcado por importantes acontecimientos, como la invención del telescopio reflector y la construcción de los primeros objetivos acromáticos. Los primeros telescopios, desarrollados a principios del siglo XVII, fueron los llamados refractores, caracterizados por usar lentes tanto en el ocular como en el objetivo. El principal problema de este tipo de telescopios venía dado por la existencia de dos defectos ópticos, llamados aberración esférica y aberración cromática, que no permitían la presentación de la imagen del astro con la nitidez necesaria para llevar a cabo observaciones de precisión²⁶. La necesidad de mejorar la calidad en la imagen dió lugar al aumento de la distancia entre las lentes (distancia focal) y, por lo tanto, de la longitud de los telescopios. No obstante, el difícil manejo de unos aparatos de varios metros, que necesitaban ser suspendidos mediante complicados sistemas, impulsó la realización de continuos intentos para acortar la longitud de los anteojos.

Mientras tanto, ya en el último tercio del siglo XVII, Newton había construido el primer telescopio reflector, cuya principal característica era la sustitución de la lente del objetivo por un espejo curvo. Tras obtener resultados negativos en sus intentos de suprimir la aberración cromática en un objetivo mediante un sistema de lentes con diferentes índices de refracción, Newton orientó sus trabajos hacia la construcción de telescopios reflectores. Teóricamente, sus ventajas respecto al antejo refractor eran considerables (por ejemplo, estaba libre del defecto de aberración cromática). Sin embargo, la dificultad de pulir el espejo con la curvatura necesaria impidió una mayor difusión de este tipo de instrumentos hasta que, a fines del siglo XVIII, William Herschel desarrollara la técnica necesaria. Ello puede explicar que, durante el largo periodo transcurrido entre su invención por Newton y su perfeccionamiento por Herschel, fueran los anteojos refractores los que tomaran ventaja en la carrera hacia la consecución de una mayor precisión²⁷.

En este sentido, no podemos olvidar a Leonhard Euler, que realizó una contribución muy positiva para el progreso de la óptica cuando, en un trabajo publicado en 1747, demostró la posibilidad geométrica de fabricar objetivos acromáticos. Poco después, en 1758, el óptico inglés John Dollond construyó y patentó un tipo de antejo dotado de un objetivo acromático, libre del defecto de aberración cromática, basándose en el principio teórico demostrado por Euler.

Como ya hemos visto, durante el siglo XVIII, la astrometría, o determinación de la posición de los astros mediante el establecimiento del valor de sus coordena-

²⁶ Véase, F.J. González, *El Observatorio de San Fernando (1831-1924)* (Madrid, 1992).

²⁷ Sobre la evolución histórica del telescopio, véanse las obras de I. Asimov, *Historia del telescopio* (Madrid, 1986), A. Danjon y A. Couder, *Lunettes et télescopes* (París, 1935), y H.C. King, *The history of telescope* (Nueva York, 1979).

das ecuatoriales (declinación y ascensión recta), terminó convirtiéndose en uno de los principales objetivos de los astrónomos de la época. Fue ésta la época del perfeccionamiento del cuarto de círculo mural, un instrumento consistente en un anteojo adosado a un cuarto de círculo fijo provisto de un nivel y situado en el plano del meridiano. El cuarto de círculo mural fue el instrumento astronómico más característico del siglo XVIII y el más especializado para la determinación de las posiciones estelares. Como ya hemos dicho, Tycho Brahe fue el primero en diseñar un cuarto de círculo de grandes dimensiones (*Quadrans Muralis*). En el siglo XVII, las pínulas de observación fueron sustituidas por anteojos, lo que otorgó al mencionado instrumento un sensible aumento de su precisión. Fue entonces cuando comenzaron a ser tenidos en cuenta los problemas derivados de la fijación del instrumento al muro y de la graduación del limbo en el que debía leerse la altura sobre el horizonte del astro observado.

De todas formas, a pesar de la mejora de las técnicas metalúrgicas, que permitían fundir el armazón en una sola pieza, y de los avances efectuados por los mecánicos de precisión ingleses a la hora de realizar las divisiones en los limbos de los instrumentos, el cuarto de círculo mural no resultaba lo suficientemente preciso para la determinación de la ascensión recta. Frente a la relativa fiabilidad que permitía en la determinación de la altura de un astro sobre el horizonte, el cuarto de círculo mural no alcanzaba mucha precisión en la determinación del instante del paso del astro por el meridiano, debido a la imposibilidad técnica de ajustar el armazón al plano del meridiano mediante su fijación a un muro que, además, estaba sometido a deformaciones causadas por los cambios de temperatura y humedad.

El astrónomo danés Olans Röemer concibió a fines del siglo XVII un instrumento especializado en la observación de los tránsitos de las estrellas por el meridiano. Dada su complementariedad con el cuarto de círculo mural, el uso de este aparato, llamado anteojo de pasos, se extendería por los observatorios europeos a lo largo del siglo XVIII. El instrumento de pasos estaba formado, en síntesis, por un anteojo fijado perpendicularmente a un eje que permitía su movimiento en un plano vertical (meridiano). De todas formas, desde su invención a fines del XVII hasta la generalización de su uso en la segunda mitad del XVIII, tendría que transcurrir el tiempo suficiente para la puesta a punto de unos buenos péndulos de precisión que permitiesen al observador tomar con exactitud la hora del paso de la estrella por el meridiano. Así pues, podemos afirmar que la necesidad de establecer exactamente el momento del paso de una estrella por el meridiano del lugar de observación, daría lugar a la utilización del péndulo, convertido en instrumento de precisión por Huygens, y perfeccionado por Graham, como complemento imprescindible en las observaciones realizadas con un anteojo de pasos para la determinación de la ascensión recta de las estrellas.

Este sería, a grandes rasgos, el estado alcanzado por la instrumentación astronómica a mediados del siglo XVIII. Por un lado, como hemos visto, la mejora de la observación de los cuerpos celestes dependía de la solución técnica a problemas ópticos y del desarrollo de telescopios reflectores (newtonianos) y refractores (comúnmente conocidos como anteojos). Por otro lado, la astrometría se había convertido (junto con la observación de los fenómenos astronómicos extraordinarios) en uno de los principales programas de trabajo para los observatorios de la época. De ahí la necesidad de dotar a estos establecimientos de un buen número de anteojos acromáticos y, además, de un cuarto de círculo mural, un anteojo de pasos y un péndulo de precisión, instrumentos básicos para las observaciones astrométricas.

La aparición, a lo largo del siglo XIX, de nuevos campos de investigación astronómica, que se añadieron a la tradicional astronomía de posición, característica de la anterior centuria, trajo como consecuencia la construcción de telescopios de grandes dimensiones. Ello explica que los grandes anteojos refractores con montura ecuatorial, usados tanto para medidas micrométricas como para observaciones de astronomía física, fueran los instrumentos de observación preferidos por la mayor parte de los astrónomos en el siglo XIX. El prototipo de esta clase de instrumentos fue un anteojo, de 24 cm. de abertura y 440 cm. de distancia focal, construido por Fraunhofer e instalado en 1824 en Dorpat. Unos años después, en 1835, George Biddel Airy, director del Observatorio de Greenwich, hizo construir en Francia un objetivo de 36 cm. de abertura para el aparato denominado ecuatorial Northumberland. Durante aquellos mismos años, W. Struve, otro de los astrónomos más conocidos de aquel tiempo, encargó a Merz y Malher, sucesores de Fraunhofer, un gran anteojo ecuatorial con 38 cm. de abertura en el objetivo, para ser instalado en el recién creado Observatorio de Pulkovo. A partir de entonces, el número de anteojos refractores de grandes dimensiones fue aumentando considerablemente, al igual que lo hacía la abertura de sus objetivos, hasta llegar al refractor de 102 cm. de abertura construido en 1897 por Alvan Clark para el Observatorio de Yerkes²⁸.

6.- Los avances de la astronomía en el siglo XIX.

El importante desarrollo de la mecánica llevado a cabo a lo largo del siglo XVIII había convertido a la astronomía en un verdadero campo de ensayo de los matemáticos, quienes, haciendo poco caso a sus aspectos físicos y experimentales,

²⁸ El proceso de instalación de los grandes anteojos reflectores con montura ecuatorial en los principales observatorios de todo el mundo, está descrito detalladamente en A. Danjon y A. Couder, *Op. cit.*

la utilizaban para comprobar la eficacia y validez de los métodos de cálculo de nueva creación. Sin embargo, diversos factores contribuirían a la modificación de esta situación. La aplicación de los métodos matemáticos al resto de las ciencias físicas, el reconocimiento de la importancia real de la mecánica experimental, la consolidación de la astronomía de posición y el nacimiento, y rápido desarrollo, de la astrofísica fueron algunos de los factores que pueden ayudarnos a comprender este cambio.

Haciendo una breve recapitulación sobre lo que hemos dicho hasta ahora, podríamos afirmar que la astronomía comenzó el siglo XIX en busca de nuevos campos de investigación. Durante la centuria precedente, esta ciencia había quedado estructurada, al igual que la física, como una disciplina científica moderna, gracias a los importantes avances registrados en aspectos como la mecánica celeste, la astrometría o las técnicas instrumentales. Por otro lado, el progreso industrial, registrado a partir de los últimos años del siglo XVIII, incidió directamente en la mejora de las técnicas de construcción de instrumentos. Los avances tecnológicos y el desarrollo de la física instrumental permitieron el diseño de nuevos aparatos, que habrían de añadirse a los instrumentos tradicionales de observación visual. Todo ello, unido al aumento de la potencia de los instrumentos, posibilitó la investigación del mundo estelar desde nuevos puntos de vista.

Como acabamos de decir, las influencias de la revolución industrial se dejaron notar claramente en la construcción de instrumentos. La estructuración en talleres artesanales especializados, característica del siglo XVIII, fue abandonada paulatinamente para dar paso a las fábricas de tipo moderno. Nuevos materiales, nuevas aleaciones y nueva maquinaria, primero de vapor y después eléctrica, revolucionaron el trabajo de los antiguos talleres. La aplicación de técnicas industriales a la construcción de instrumentos científicos provocó el abaratamiento del coste de determinados aparatos, sin tener como consecuencia una pérdida en su precisión, de ahí la gran difusión que, a lo largo del siglo XIX, tendrían instrumentos como los sextantes o los cronómetros marinos²⁹.

En lo que se refiere a la astrometría, no podemos dejar de reseñar las aportaciones de los astrónomos ingleses del Real Observatorio de Greenwich, que tendrían mucho que ver con el progreso de las técnicas utilizadas en la astronomía de posición durante el siglo XIX. Personajes como Pond, Airy o Bessel, estarían directamente relacionados con el establecimiento de las condiciones para el uso de anteojos meridianos, entre las que podríamos destacar la determinación de las

²⁹ Sobre la construcción de instrumentos en el siglo XIX, además de las obras ya citadas, pueden consultarse G.L'E. Turner, *Nineteenth-century scientific instruments* (Berkeley, 1983) y A. McConnell, *Instruments makers to the world* (York, 1992).

constantes instrumentales, el reconocimiento de la vertical por observación del nadir (autocolimación sobre la superficie de un horizonte artificial de mercurio) o la corrección de los errores de graduación de las escalas grabadas en los círculos³⁰.

Por otro lado, la demostración de la existencia de un error de estimación individual en cada observación (llamado ecuación personal) y la aplicación del micrómetro impersonal a los instrumentos serían nuevos pasos en pos de la exactitud de los datos. La introducción del micrómetro impersonal, diseñado definitivamente por Repsold en 1889, permitiría al observador, mediante un hilo móvil, seguir el desplazamiento de una estrella en su campo visual, de forma que, cuando el sistema de arrastre del hilo pasaba por unos puntos regularmente situados a un lado y a otro del meridiano se producían unos registros automáticos de tiempo. No podemos olvidar, además, otra de las innovaciones registradas en el siglo XIX, la utilización de los cronógrafos en las observaciones, unos aparatos que, al registrar las oscilaciones del péndulo y el instante de la observación, contribuyeron decisivamente a la mejora de la exactitud de la toma de tiempo, imprescindible en las observaciones de pasos de estrellas.

Gracias a todas estas mejoras, la determinación de posiciones estelares y, por lo tanto, la elaboración de catálogos de estrellas continuó siendo uno de los principales objetivos de los astrónomos durante el siglo XIX. Este sería el punto de partida para la confección de los catálogos fundamentales, formados por las posiciones y los movimientos propios de un pequeño número de estrellas, objeto de numerosas mediciones absolutas para determinar sus coordenadas ecuatoriales y sus variaciones anuales.

Por último, no podemos olvidar que los rápidos progresos efectuados en el campo de la física experimental marcaron el comienzo de la ampliación de las investigaciones astronómicas³¹. La posibilidad de analizar la radiación emitida por los astros permitió el desarrollo de una nueva vertiente de las investigaciones astronómicas, centradas hasta entonces en el problema de las posiciones y los movimientos de los astros. Las investigaciones de Wollaston, Foucault, Bunsen y Kirchhoff culminaron con los trabajos de este último, que consiguió detectar en el Sol la presencia de elementos conocidos en la Tierra. La importancia de este descubrimiento trajo consigo un rápido desarrollo de la espectroscopía y la espectrometría astronómicas, y el nacimiento de la astrofísica, un campo de la investigación astronómica cuyo espectacular desarrollo ha llegado hasta nuestros días.

³⁰ Véase, F.J. González, *Op. cit.*

³¹ Véase, E.E. Snyder, *Historia de las ciencias físicas* (Barcelona, 1973).

8.- La introducción de las técnicas fotográficas en la astronomía.

Una de las principales características de la astronomía del siglo XIX fue la paulatina sustitución de la observación directa por registros físicos, especialmente por la fotografía. Desde su aparición, la fotografía fue considerada como un poderoso auxiliar de la astronomía. La aplicación de las técnicas fotográficas a la astronomía afectó directamente a campos de investigación muy diversos. El estudio físico de los cuerpos celestes, razón de ser de la astrofísica, se benefició rápidamente del uso del espectrógrafo, que sirvió para reducir el tiempo de observación necesario para el análisis espectral al correspondiente a la duración de una exposición fotográfica. Mientras tanto, la capacidad de la placa fotográfica para registrar una imagen fiel y duradera, en la que poder llevar a cabo mediciones de precisión, permitió a la astrometría emprender trabajos de una magnitud inimaginable con los métodos convencionales de observación directa, especialmente en el campo de los catálogos estelares.

Como ya sabemos, el astrónomo inglés William Herschel destacó, a fines del XVIII, por dedicarse a la investigación sistemática sobre la naturaleza y construcción del Universo, iniciada años atrás por otros astrónomos, que habían intentado descifrar las causas de la distribución de los astros en el espacio, y las leyes a las que ésta se encuentra sometida. Este sendero fue seguido por los astrónomos del siglo XIX, que obtuvieron importantes resultados parciales, pero la gran cantidad de observaciones y cálculos que requería el conocimiento de las posiciones en el espacio de todos los astros visibles, exigía, con los métodos convencionales, un impresionante número de años de trabajo. La fotografía supondría el medio técnico imprescindible para poder realizar tan magno trabajo.

La idea de aplicar la fotografía a la reproducción de los cuerpos celestes nació el mismo día en que Niepce y Daguerre alcanzaron sus primeros descubrimientos. Desde el primer momento, se llevaron a cabo ensayos para obtener imágenes de la Luna, el Sol y las estrellas. A mediados del siglo XIX, ya era normal hacer fotografías de los eclipses de Sol, especialmente en Francia e Inglaterra. Fue el astrónomo francés Dominique François Arago el primero en proponer la aplicación de la fotografía a la astronomía con la intención de obtener un buen mapa de la Luna y una imagen del espectro solar. Ello no sería posible, sin embargo, hasta que en 1843 J. W. Draper consiguiera superar las imperfecciones del daguerrotipo. Los avances fueron continuos a partir de entonces. En 1845 A. H. Fizeau y J. B. L. Foucault obtuvieron una excelente fotografía del Sol y en 1849 Faye propundría el uso de la fotografía para la observación de los pasos de Venus por delante del Sol. Las mejoras técnicas, que se sucedían con rapidez, permitieron al profesor W. C. Bond, director del Harvard College Observatory, gracias al empleo del colodión, fotografiar en dos segundos estrellas de primera y segunda magnitud. Poco después,

Warren de la Rue, tras encargar la construcción del llamado foheliógrafo de Kew, llevó a cabo un proyecto consistente en fotografiar el Sol todos los mediodías para estudiar la evolución de las manchas y protuberancias solares. Como se ha podido ver, durante esta primera etapa de introducción de las técnicas fotográficas en las observaciones astronómicas, la inmensa mayoría de las pruebas habían estado dirigidas hacia el estudio de la astronomía física, es decir el aspecto y la luminosidad de los astros. En 1874 se dió el primer paso en la utilización de la fotografía para la determinación de las coordenadas astronómicas cuando, en las observaciones del paso de Venus por el disco solar, además de fotografiar los aspectos físicos del fenómeno, se trató de determinar con la fotografía la distancia del planeta a los limbos, aunque los resultados obtenidos no fueron del agrado de los astrónomos. Fue ésta la primera ocasión en que la fotografía fue utilizada como auxiliar de la astronomía de manera generalizada. Los astrónomos de todos los países decidieron intentar esta experiencia, observando simultáneamente de forma directa y fotográfica las distintas fases del fenómeno. Esta iniciativa sirvió para llamar la atención de los astrónomos sobre las variadas aplicaciones que podría tener para la astronomía el empleo de la fotografía durante las observaciones astronómicas³².

La invención del colodión seco, que permitía prolongar las exposiciones, y del gelatino-bromuro, utilizado para aumentar la sensibilidad de las placas, contribuyó a simplificar de tal forma el procedimiento que, en 1881, H. Draper tardaría sólo una hora en obtener una buena imagen de la nebulosa Orion, llegando a captar las estrellas de 14^a magnitud. Los trabajos iniciados por M. E. Pickering en el Harvard College Observatory, para la elaboración de una carta celeste que incluyera las estrellas visibles (hasta la 6^a magnitud) desde el hemisferio Norte, llevaron a este astrónomo a idear un procedimiento para determinar las magnitudes de las estrellas.

La técnica fotográfica abrió, pues, una nueva era en la astronomía observacional, tanto en lo que se refiere a la determinación de posiciones (astrometría) como al estudio físico de los cuerpos celestes (astrofísica). Entre sus principales ventajas, pronto destacaron la posibilidad de conservar una imagen fiel y duradera en las reproducciones fotográficas, la capacidad de la placa fotográfica de integrar la luz recibida a lo largo del tiempo y la posibilidad de poder realizar en ellas mediciones de precisión. Gracias a estas ventajas, la fotografía astronómica pudo ser utilizada en aspectos como el estudio de la física solar (especialmente en los eclipses de Sol, en conjunción con el espectroscopio), el descubrimiento de nuevos cuerpos celestes (sobre todo pequeños satélites y asteroides) o la elaboración de catálogos astrométricos.

Dentro de esta última vertiente debe ser incluida la iniciativa del almirante

³² Véase, F.J. González, *Op. cit.*

Mouchez, director del Observatorio de París, caracterizada por la utilización de la fotografía para el levantamiento de un mapa general del cielo. Este proyecto, al que nos vamos a referir a continuación, terminaría convirtiéndose en la primera empresa astronómica internacional de gran envergadura, antecedente directo de instituciones actuales como la Unión Astronómica Internacional.

Unos años más tarde de la utilización de la fotografía en las observaciones del paso de Venus de 1874, dos astrónomos del Observatorio de París, Paul y Prospér Henry, fueron encargados de continuar la confección de unas cartas celestes iniciadas unos años antes. Haciendo este trabajo, llegaron a regiones del cielo en las que los grupos de estrellas se presentaban tan próximos y compactos, que les resultaba casi imposible determinar sus posiciones con exactitud. Fue en este punto, cuando se les ocurrió la idea de recurrir a la fotografía y construyeron un objetivo de 16 cm., con el que obtuvieron un interesante cliché de una zona de la Vía Láctea en 1884. El director del Observatorio de París, quedó tan positivamente impresionado por los resultados obtenidos que aceptó inmediatamente una propuesta de los hermanos Henry, consistente en construir un nuevo aparato con un objetivo de 33 cm., cuya parte mecánica fue encargada al prestigioso constructor de instrumentos científicos P. Gautier. Cuando éste estuvo terminado, los resultados obtenidos con él fueron tan satisfactorios, que pronto fue tomando forma la idea de hacer algo más que la simple continuación del trabajo encomendado a los hermanos Henry.

Mouchez propuso entonces la idea de confeccionar una carta general del cielo por medio de la fotografía, con la colaboración de astrónomos de todos los países. Se trataba de un magno proyecto dirigido a catalogar completamente los astros de la bóveda celeste, visibles por medio de los más potentes instrumentos de observación de la época. Al definir el estado del cielo en los últimos años del siglo XIX, se iba permitir estudiar, además de la distribución de las estrellas en el espacio y la construcción del universo visible, que eran los principales motivos del trabajo, la evolución y movimiento de los astros cuando, años más tarde, fuesen analizados los cambios de posición de las estrellas fotografiadas.

Para conseguir la realización de un proyecto de tanta importancia científica, Mouchez trabajó en la organización de una reunión internacional de astrónomos, en la que se tratase sobre la construcción de una carta fotográfica del cielo, tal como él la había ideado. La Academia de Ciencias de París patrocinó la convocatoria, y cursó invitaciones a diversas sociedades científicas y a los directores de los observatorios más importantes de la época, que tendrían que acudir a París en abril de 1887. El Congreso Astrofotográfico Internacional, también conocido como Conferencia de Astrónomos de París, supuso para la astronomía un acontecimiento de tal importancia, que superó con creces las dimensiones y alcance de las anteriores reuniones internacionales de astrónomos. El día 16 de abril de 1887, bajo la presidencia del Ministro de Asuntos Exteriores francés, se encontraron reunidos

en París cincuenta y seis científicos de todo el mundo, dispuestos a ponerse de acuerdo para la ejecución de un mapa general del cielo. En marzo de 1888, trece observatorios habían dado órdenes para la construcción de los instrumentos: Potsdam, Oxford, Melbourne, Sidney, Rio de Janeiro (sustituido más adelante por Perth), Santiago de Chile, San Fernando, París, Burdeos, Toulouse, Argel, Tacubaya y La Plata (sustituido por Córdoba). El desarrollo de la empresa científica podía darse, pues, por seguro³³.

Los trabajos del proyecto que había ideado Mouchez en 1887 no serían terminados por los dieciocho observatorios de todo el mundo que finalmente se comprometieron en la empresa hasta bien entrado el siglo XX, pues una vez iniciado su desarrollo se comprobó su enorme complejidad, haciéndose necesaria la realización de un catálogo previo que sirviera de referencia para poder llevar a cabo con precisión la elaboración del la Carta Fotográfica del Cielo propiamente dicha³⁴. El proyecto emprendido en 1887 tenía tal magnitud y debía utilizar unas técnicas tan nuevas y poco experimentadas, que su finalización en poco tiempo habría sido imposible. Hizo falta más de medio siglo para completarlo definitivamente, pero los resultados están ahí, cinco millones de estrellas contenidas en los catálogos de los diversos observatorios. Una fotografía del cielo, en una época determinada, que sigue siendo fuente importante para numerosas investigaciones actuales. Los trabajos del Catálogo Astrofotográfico y de la Carta del Cielo fueron,

³³ Como representante español en el Congreso de 1887, fue invitado Cecilio Pujazón, director del Observatorio de San Fernando. A su regreso de París, informó a sus superiores de los acuerdos tomados para la construcción de una carta fotográfica del cielo y de la conveniencia de la participación de España en los trabajos. El Gobierno aprobó sus propuestas y, rápidamente, le fue comunicado que se aceptaba su proceder en lo referente a este asunto, instándole a iniciar las gestiones para la adquisición e instalación de los instrumentos necesarios. En noviembre de 1889, llegaron a San Fernando las cajas que contenían el instrumento fotográfico. El instrumento, que aún se conserva y continúa instalado en su ubicación inicial, se compone de dos anteojos unidos, formados por un sólo tubo metálico en forma de paralelepípedo y separados por una delgada pared; uno de ellos, cuyo objetivo es de 33 cm. y su distancia focal de 3,43 m., sirve de cámara fotográfica; y el otro, destinado a la observación directa, tiene 20 cm. de apertura y 3,60 m. de distancia focal. Sobre la participación española en el proyecto internacional de la Carta del Cielo, véase el artículo de F.J. González, "La Carta Fotográfica del Cielo en España", publicado en *Llull*, vol. 12 (1989), 323-340.

³⁴ En San Fernando, siguiendo la información reseñada en las memorias anuales del Observatorio, se puede constatar cómo en 1894 ya estaban terminadas las 1260 placas correspondientes al Catálogo Astrofotográfico. Sin embargo, los clichés de la Carta del Cielo no fueron terminados hasta 1923, al mismo tiempo lo hacían Greenwich y Oxford. El Catálogo, que recogía más de 400.000 estrellas comenzó a ser publicado en 1921, mientras iba saliendo de la imprenta una buena cantidad de ejemplares impresos de los clichés de la Carta. En 1929 fue publicado el sexto, y último, volumen del Catálogo Astrofotográfico de San Fernando, culminando así un trabajo que había ocupado a una parte importante del personal del Observatorio durante cerca de cincuenta años. Véase, F.J. González, *Op. cit.*

en su época, la principal manifestación de colaboración astronómica internacional a nivel institucional, siendo, uno de los antecedentes directos de la creación de la Unión Astronómica Internacional en 1919, surgida de la reunión de conferencias internacionales como la International Geodetic Union, la Carta del Cielo y la International Solar Union³⁵.

³⁵ Véase, la obra de P. Doig, *A concise history of astronomy* (Londres, 1950).