

Este artículo aparecerá publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 2004.

250 AÑOS DEL REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA¹

Rafael C. Boloix Carlos-Roca

Real Instituto y Observatorio de la Armada
Ministerio de Defensa

Abstract

In 1753 the first national astronomical observatory of Spain, the Royal Observatory of Cádiz, was founded as an educational complement to the Naval Academy. Two hundred and fifty years of work in astronomy, development of new applications (hydrography, computation of ephemeris, etc.), and scientific research are described.

Introducción

El problema de la determinación de la longitud en la mar, que desde el mismo momento en que Cristóbal Colón efectúa la primera travesía oceánica se pone de manifiesto, es uno de los problemas más complejos con los que se enfrentó el hombre durante casi tres siglos. De vital importancia para los pueblos marineros pues en ello les iba la seguridad de los navegantes, sus buques y mercaderías. Para España y Portugal existía el problema añadido de la determinación de los límites territoriales en los dominios de ultramar fijados en el Tratado de Tordesillas en 1494, mediante el meridiano situado a 370 leguas al oeste de la isla de Cabo Verde.

A lo largo de los años fueron propuestas numerosas e ingeniosas ideas y soluciones para resolver el problema de la determinación de la longitud en la mar. De entre todas ellas, en el segundo tercio del siglo XVIII, destacaban dos que, a la postre, dieron resultados válidos: El método de las distancias lunares y el del cronómetro marino. La primera de estas soluciones, de carácter puramente astronómico y de difícil realización, exigía un profundo conocimiento en mecánica celeste y en astronomía de posición; la segunda solución, de fácil aplicación, requería una elevada capacidad instrumental y técnica. De todos es conocido que este segundo procedimiento fue, finalmente, la solución última y que, desde entonces, con los continuos y profundos avances experimentados en este campo,

¹ Adaptado de la conferencia inaugural de las Jornadas Científicas *250 años de Astronomía en España* que tuvieron lugar los días 23 a 25 de septiembre de 2003 en San Fernando (Cádiz).

podemos decir que la medida del tiempo, ese ente de razón que fluye y se nos escapa de forma irrefrenable, es el que nos da vida.

El insigne marino Jorge Juan, profundo conocedor de la utilidad de las aplicaciones prácticas de la observación astronómica, convencido de la conveniencia y necesidad del conocimiento y utilización de esas técnicas por los marinos, imagina y propone al Marqués de la Ensenada, en carta fechada el 26 de diciembre de 1749, la creación de un observatorio astronómico junto a la Academia de Guardias Marinas. En su propuesta hace, una vez más, demostración de su capacidad e ingenio, al combinar una triple idea política, científica y práctica. Política, crear un Observatorio Real, de similares características a los existentes en otros reinos. Científica, un centro dedicado a la investigación y estudio de la astronomía. Práctica, un centro dedicado a enseñar la navegación astronómica a los marinos, enseñanza fundamental y necesaria para la seguridad de hombres y barcos. Tras la aceptación por el Marqués de la Ensenada de la propuesta formulada por Jorge Juan y pasado el forzoso periodo de acopio, montaje y preparación de los instrumentos se inician los primeros trabajos de observación en el torreón del castillo de la ciudad de Cádiz, sede de la Academia de Guardias Marinas, en el año 1753.

Una vez instalados los instrumentos e iniciados los trabajos de observación, fue necesario que transcurrieran algunos años hasta que el nuevo establecimiento de la Armada alcanzase alguna notoriedad científica. La expectativa que había levantado el nombramiento como Director de la Academia de Guardias Marinas de Luis Godin, académico francés y miembro de la expedición científica al reino de Perú para la medida del arco de meridiano, no se correspondió con la realidad pues la actividad observacional fue extremadamente baja. El traslado de la Academia de Guardias Marinas a la Isla de León aumentó, aún mas, las dificultades de los trabajos de observación tanto por el problema de la distancia como por el reducido número de personas que permanecieron en el Observatorio.

La colaboración en las observaciones prestada por Vicente Tofiño y Gerardo Henay durante el transcurso del tránsito de Venus de 1769, junto con las observaciones efectuadas en la baja California por la expedición Hispano-francesa, que permitió el contacto directo y continuado con astrónomos y científicos europeos, contribuyeron de forma decidida a la reactivación de las actividades del Observatorio, reforzando la posición e importancia de éste dentro de la Academia de Guardias Marinas y de la Armada.

Tofiño y José Varela, tras la determinación de los errores del cuarto de círculo mural de Bird, efectuaron observaciones sistemáticas durante el período 1773-1776, para la determinación del mediodía mediante el método de las alturas correspondientes y por observaciones del paso del Sol por el meridiano. Estas observaciones fueron esenciales tanto para la determinación de los errores del cuarto de círculo mural como para el

establecimiento del meridiano del observatorio de Cádiz, que pasó a ser el primer meridiano, y la determinación y conservación de la hora, asuntos de suma importancia en un observatorio astronómico y naval.

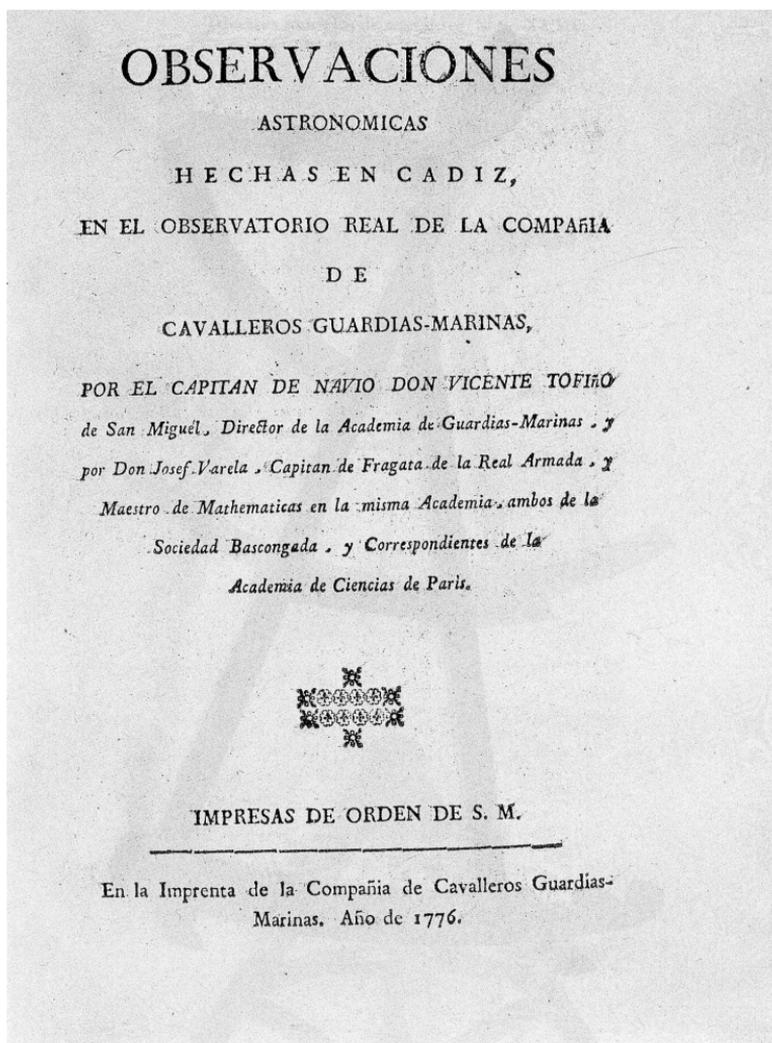


Figura 1: *Observaciones Astronómicas* de Vicente Tofiño y José Varela, donde se recogen los resultados del primer programa sistemático de observación realizadas en el Observatorio de Cádiz. (Todas las ilustraciones de este artículo han sido proporcionadas por el RIOA, salvo que se indique otra fuente.)

La continuada práctica de utilizar los conocimientos astronómicos para determinar la posición geográfica tanto en la mar como en tierra que tenían los marinos, especialmente aquellos que habían sido instruidos en el Observatorio de la Armada o estaban destinados en él, le hacían ser unos expertos en la determinación de coordenadas precisas de puntos principales para la elaboración de redes cartográficas. Por ello, tras la llegada al poder de Floridablanca, el Estado necesita del Observatorio de Cádiz y de los oficiales en él formados. Vicente Tofiño fue encargado de la dirección de la Comisión Hidrografía de las Costas de España, que estaba formada por los oficiales de la Armada Dionisio Alcalá Galiano, José Espinosa y Tello, Alejandro Belmonte, Julián Canelas, José Vargas Ponce, Felipe Bauzá y Cañas y José María Lanz, todos ellos destinados en el Observatorio. De todos es conocido el resultado de estos trabajos plasmados en el Derrotero de las costas de España en el Mediterráneo (1787), el Derrotero de las costas de España en el océano Atlántico (1789) y en el Atlas marítimo de España (1789). Esta primera campaña de levantamiento cartográfico, llevada a cabo por el personal del Observatorio, sería seguida en los años venideros, por un gran número de otras en las que participan algunos de estos mismos oficiales. Podemos decir que, de una u otra forma, los primeros frutos de la actividad científica y docente con aplicación práctica, llevada a cabo por el Observatorio de la Armada, es el florecimiento de la cartografía española.

Para resolver el problema del cálculo de la longitud es necesario contar con la información adecuada. Es necesario disponer con antelación del instante de ocurrencia de cualquier fenómeno observable en dos lugares diferentes, datado en uno de ellos de posición geográfica conocido. Esto requiere un adecuado conocimiento de mecánica celeste, que permita determinar con precisión el instante de la ocurrencia, y su publicación con antelación suficiente para que estos datos estén disponibles para el utilizador.

En un principio, en la publicación conocida como Estado General de la Armada, se incluía, extraída de los Almanagues Náuticos elaborados por Francia e Inglaterra, parte de la información astronómica necesaria para resolver los problemas básicos de navegación. Desde el año 1791, por orden del Rey, en el Real Observatorio de Cádiz, se inició el trabajo de cálculo y elaboración del Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas con los datos referidos al meridiano del Real Observatorio, primero de Cádiz y más tarde al de la Isla de León, hoy San Fernando. Piénsese en la época, finales del XVIII y siglos siguientes, y se puede entender que, durante un largo periodo de tiempo, este trabajo se llevaba a cabo con varios años de antelación. Desde aquella fecha, hasta la actualidad, esta responsabilidad se ha mantenido de forma ininterrumpida hasta la fecha.

La enorme dificultad y volumen de cálculo que implicaba su elaboración significó, en muchas ocasiones, que el trabajo absorbía gran parte de la ac-

tividad del centro. A lo largo de muchos años, la información suministrada como explicación del cálculo del propio Almanaque y las correspondientes a su utilización, constituyeron un auténtico elemento de enseñanza de astronomía y de náutica. Con el transcurrir de los años la cantidad de información incluida en el Almanaque y la precisión de estas aumentó considerablemente de tal forma que fue conveniente desglosarla en dos publicaciones diferentes, de todos conocidas: el Almanaque Náutico, propio para los navegantes, y las Efemérides Astronómicas, propias para astrónomos y geodestas.

Establecido el Real Observatorio en su actual emplazamiento del Pago de Torrealta en la Isla de León, vecindad próxima a Cádiz, en donde se había establecido la cabecera del Departamento Marítimo de Cádiz, el observatorio inicia una nueva etapa pues reúne las condiciones adecuadas para ello, la dirección del centro es independiente, la Oficina de Efemérides está consolidada, cuenta con un taller de relojería para atender a los cronómetros navales y péndulos de precisión y con el depósito de instrumentos científicos y náuticos necesarios para las campañas y expediciones científicas. Su director, Rodrigo Armesto estructura las actividades del centro en cuatro ramas que, con ligeras variantes, ha permanecido hasta nuestros días.

La Astronomía en el Observatorio

La Sección de Astronomía del Observatorio, ha centrado su trabajo fundamentalmente en la Astrometría Meridiana, en la elaboración de los catálogos fundamentales de estrellas, en la determinación de las coordenadas al máximo nivel, participando por lo tanto en los trabajos propuestos por Armesto de determinación de la eclíptica, el plano ecuatorial, los intervalos equinocciales, el primer punto de Aries, la precesión, la nutación, la rotación de la Tierra y la determinación de la Hora. Ya, en la instrumentación fundamental de los inicios del Observatorio de Cádiz, se disponía de los elementos necesarios para las observaciones astrométricas: un cuarto de círculo mural de John Bird y un péndulo de precisión. Con ellos se desarrolló el primer plan sistemático de observaciones astrométricas realizadas en un observatorio español, trabajo llevado a cabo por Vicente Tofiño y José Varela entre los años de 1773 y 1776.

Tras el traslado del Observatorio a la Isla de León, se instalan, entre 1830 y 1834, un círculo mural, un antejo de paso y un péndulo, todos ellos de Thomas Jones. Estos instrumentos constituyeron los elementos magistrales de la astrometría española por un largo periodo de casi treinta años. De los trabajos realizados con ellos se disponen de los resultados publicados correspondientes a los años 1833, 1834 y 1835 así como de los borradores de las observaciones efectuadas hasta el año 1859.

Al objeto de mantener la calidad de las observaciones al máximo nivel que la técnica y el arte permitían se adquiere un Círculo Meridiano Troughton & Simms de características similares al instrumento ideado pocos años antes por Airy e instalado en el Observatorio de Greenwich. Su instalación se lleva a cabo en el año 1862, tras la remodelación del edificio y el acomodamiento del salón de observaciones, que fueron de tal calibre que tuvieron como consecuencia una reforma total del edificio principal del Observatorio.

Este círculo Meridiano tenía 20 cm de apertura y una distancia focal de 353 cm. El ocular estaba previsto de siete hilos verticales fijos y uno móvil, además del horizontal, que también era móvil. El eje horizontal, de 183 cm de longitud, era de acero fundido. El círculo vertical, con 183 cm de diámetro, fijo a la parte occidental del eje horizontal era de acero fundido con una banda de plata, en su cara externa con graduaciones de cinco en cinco minutos de arcos. Para su lectura disponía de seis microscopios que permitían la lectura de las medidas con precisión de la milésima de minuto de arco. Contaba así mismo con dos colimadores, situados al Norte y Sur, en el mismo salón meridiano, y de un horizonte artificial formado por una cubeta de mercurio.

Hasta bien entrado el siglo XX, la técnica de observación con un aparato de estas características consistía en dividir el campo de visión en tres zonas, que el astro iba atravesando en su movimiento diurno. En las dos zonas externas se medía una de las coordenadas celeste y, en la zona central, la otra. La Ascensión Recta se obtenía midiendo la hora sidérea a la que el astro pasaba por los hilos verticales fijos con el auxilio del hilo móvil que seguía al astro en su movimiento a través del ocular. La medida de la altura, que permitía obtener la declinación del astro se hacía mediante el hilo horizontal y leyendo la posición de este en un micrómetro asociado al movimiento de este hilo.

Junto a las observaciones diarias de colimación, inclinación del eje de muñones y punto nadir, se llevaba a cabo la observación de las estrellas pertenecientes al catálogo de las doscientas estrellas publicadas en los Almanques Náuticos, las 36 estrellas de Maskelyne, el Sol, Luna, planetas principales y asteroides seleccionados.

A este instrumento se le sumó, en 1869 el antejo ecuatorial Brunner y, en 1889, el astrógrafo Gautier. Este último fue adquirido para participar en el programa internacional de la Carta del Cielo, primera campaña internacional encaminada a levantar un ambicioso catálogo astrométrico del cielo hasta magnitud próxima a 18 y con la idea de repetir cada 25 años las observaciones y estudiar y analizar en profundidad los movimientos propios.

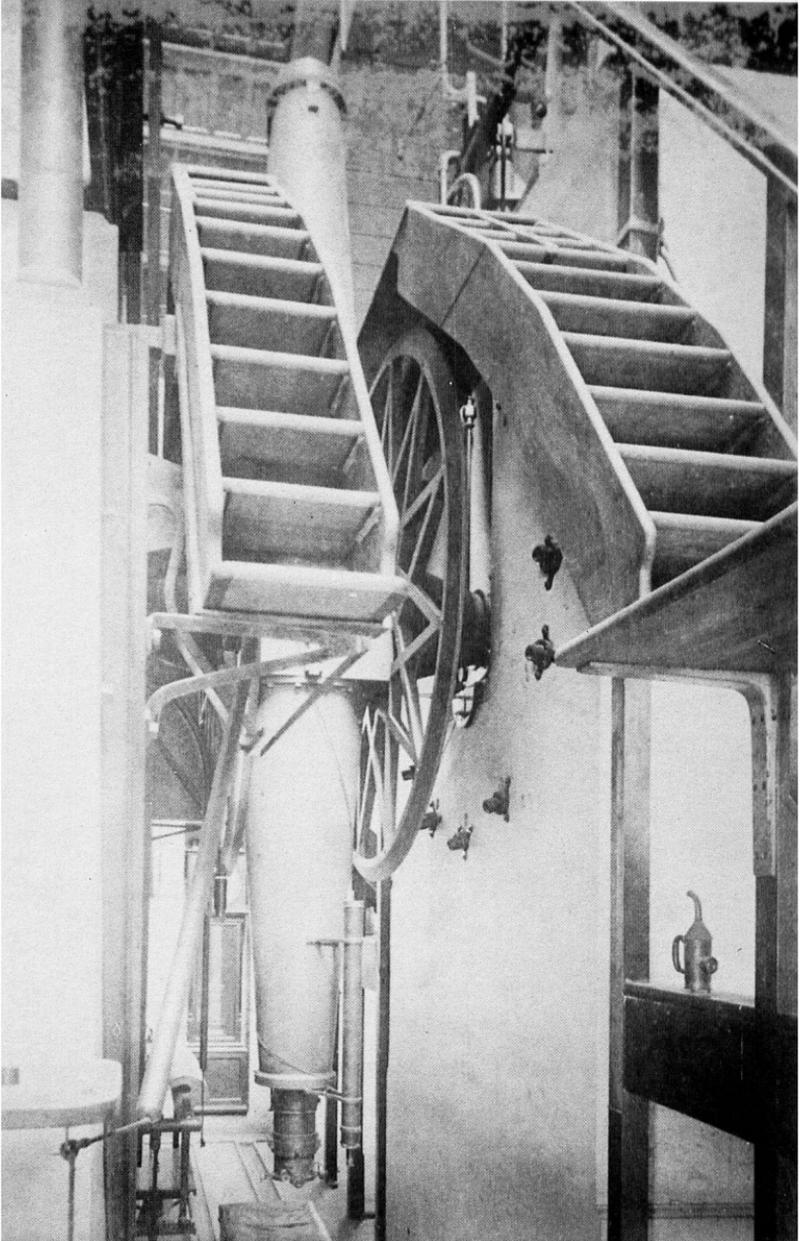


Figura 2: Círculo meridiano Troughton & Simms, instalado en 1862.

Tras diversas vicisitudes motivadas por razones estructurales de la cimentación del edificio principal en 1946 se suspenden las observaciones hasta la resolución de dichas anomalías, aprovechándose estas circunstancias para encargar un nuevo instrumento meridiano. En esta ocasión se trataba de un círculo meridiano Grubb Parsons, similar al instalado en el Observatorio de Greenwich e idéntico al instalado en la Universidad de Copenhague. El instrumento entró en funcionamiento en marzo de 1953 y tras las labores de ajustes y control de la orientación del instrumento, estudio de los errores de graduación del círculo y análisis de la flexión del tubo empezaron los trabajos rutinarios en el año 1955. Su primera misión científica fue la de observación, en conjunción con los anteojos de pasos Repsold y Bamberg, para la determinación de la hora y de la longitud del Observatorio, con motivo del Año Geofísico Internacional (1957-1959). A partir de entonces el nuevo círculo meridiano sería utilizado en las observaciones relacionadas con la determinación de la hora y en diversos programas de carácter internacional. De entre ellos cabe señalar:

Southern Reference Star (SRS) Hacia el año 1950, la Comisión de Astronomía de Posición de la Unión Astronómica Internacional, planteó a trece observatorios dotados con círculos meridianos la necesidad de conseguir las posiciones de 40.000 estrellas hasta magnitud 9,5 pues se había comprobado que el número de estrellas de magnitud hasta 7,5 contenidas en el catálogo fundamental FK4, resultaba insuficiente para muchas investigaciones astronómicas.

Resultado de ello fue la participación del Observatorio de San Fernando, entre 1963 y 1973, en el programa internacional denominado Estrellas de Referencia del Hemisferio Sur (SRS), encargándose de las posiciones de 3.709 estrellas correspondientes a la zona de declinación entre -10° y -30° , zona en la que también participaron el Observatorio Naval de Washington y el Observatorio de Tokio. En total, a lo largo de los once años de trabajo se llevaron a cabo 1590 sesiones de observación, en las que se observaron 16.935 pasos de estrellas del catálogo SRS y 7.924 pasos de estrellas del catálogo FK4. Los resultados de este trabajo fueron publicados en el *Catálogo SRS de San Fernando. Zona de -10° a -30° . Equinoccio 1950.0* (San Fernando, 1987).

Northern Photographic Zenit Tubes (NPZT) En 1970, la Comisión de Astronomía de Posición de la Unión Astronómica Internacional propuso la realización de un nuevo programa de observaciones, organizado por el Observatorio de Tokio y destinado a referir al sistema FK4 las posiciones y movimientos propios de las estrellas que se estaban observando con 12 tubos cenitales fotográficos situados en observatorios del hemisferio Norte. En este trabajo participaron un total de diez observatorios, entre ellos el de San Fernando. El tra-

bajo, llevado a cabo entre 1973 y 1980 hizo que el Observatorio de la Armada observase 1.716 estrellas, con declinaciones comprendidas entre $+10^{\circ}$ y $+60^{\circ}$. Para su realización práctica, a lo largo de los ocho años que duró el trabajo, se efectuaron 585 sesiones de observación, en las que se observaron 7.490 pasos de estrellas del SRS y 9.546 pasos de estrellas del FK4. Los resultados fueron publicados en el Catálogo NPZT de San Fernando. Equinoccio 1950.0 (San Fernando, 1988).



Figura 3: Anteojo ecuatorial Brunner, instalado en 1869.

Como ya se ha señalado, la Universidad de Copenhague disponía de un círculo meridiano Grubb Parsons similar al del Observatorio de San Fernando y aproximadamente la misma época de construcción. Desde 1970 en adelante, este instrumento fue sometido a un largo proceso de transformación y modificación siendo el resultado final un Círculo Meridiano Automático de altas prestaciones. Las mejoras instrumentales y el aumento en eficacia y precisión del instrumento hicieron pensar a los responsables del Observatorio de Copenhague en instalar este instrumento

en un observatorio de montaña con una excelente calidad de cielo. Como consecuencia de ello, el Observatorio de la Universidad de Copenhague y el Observatorio Real De Greenwich presentaron un proyecto conjunto para la instalación y utilización del círculo meridiano danés en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la Isla de La Palma, dependiente del Instituto Astrofísico de Canarias. Tras los correspondientes convenios, en Real Instituto y Observatorio de la Armada, se hizo cargo del 20 % del tiempo de observación asignado a los astrónomos españoles, al ser este observatorio el único de España dedicado a la astrometría meridiana.

El Real Instituto y Observatorio de la Armada, que había iniciado contactos en relación con el proyecto conjunto de los daneses y británicos en la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional en 1979, se integró en el proyecto y en 1980 se crea el Comité de Dirección del Círculo Meridiano Automático Carlsberg (CMAC), nombre que recibió dicho instrumento por ser la Fundación Carlsberg quien financió su modernización.

Esta activa participación del Observatorio de San Fernando en los trabajos del Círculo ha sido francamente fructífera. No solo se ha participado de forma continuada en los trabajos de observación sino que también se ha colaborado en el análisis de los errores instrumentales, modificaciones subsiguientes y elaboración y publicación de los diversos catálogos generados, sino que también, siguiendo el camino trazado por la Universidad de Copenhague y con su inestimable apoyo, se procedió a la modernización del instrumento meridiano existente en San Fernando. Desde 1987, en que se interrumpen las observaciones en este observatorio para iniciar los trabajos necesarios hasta finales de 1995 se llevaron a cabo los trabajos de modernización y adaptación del círculo meridiano y a la búsqueda de emplazamiento adecuado que culminó, con la aprobación de la Comisión Nacional de Astronomía, en la decisión de la instalación en el hemisferio sur, alcanzándose, en 1992, la firma de un acuerdo para su instalación en la Estación de Altura Carlos Ulrrico Cesco, perteneciente al Observatorio Astronómico Félix Aguilar de la Universidad de San Juan (Argentina).

Finalmente en mayo de 1996 se desmontó el instrumento y se trasladó a Argentina quedando instalado e iniciando las primeras observaciones en julio de ese mismo año, en el emplazamiento conocido como El Leoncito, situado a 2.330 m de altitud en la vertiente oriental de los Andes.

Desde aquella fecha el Real Instituto y Observatorio de la Armada, con el Círculo Automático de San Fernando en Argentina y el Círculo Automático Carlsberg trabaja de forma activa en las observaciones y reducciones subsiguientes que dan como resultado la elaboración de los Catálogos astrométricos de mayor precisión llevados a cabo mediante observaciones efectuadas desde tierra, siendo el único observatorio que puede observar todo el cielo.

Para finalizar quisiera señalar que, en estos momentos, se está en plena

negociación con la Universidad de Copenhague para la posible cesión, en usufructo, del Círculo Meridiano Carlsberg. Si las negociaciones llegan a buen puerto el Observatorio de la Armada dispondría, a tiempo completo, de los dos Círculos Meridianos lo que pondría a la astrometría española en una posición de privilegio en los próximos años y, en tanto no esté operativo el satélite GAIA, con ambos instrumentos se podrá realizar la más importante labor en este campo. Desde aquí, en el caso de que sea una realidad, pongo a disposición de toda la comunidad científica española ambos instrumentos.

Las Efemérides Astronómicas

La necesidad de conocer, a priori, la posición teórica de la Luna y demás astros utilizados en las observaciones astronómicas de los navegantes, hizo conveniente y necesario la publicación de un Almanaque, al estilo de los publicados por el Observatorio de París o el de Greenwich.

En el año 1790, el 3 de diciembre, el ministro Antonio Valdés dio instrucciones precisas al respecto a José Mazarredo:

"...que las Efemérides o tablas astronómicas, que deben acompañar al estado de la Real Armada, se impriman en ese departamento, cometiendo este encargo a los Oficiales destinados en el Observatorio de Cádiz; a fin de que arreglándolas a su Meridiano salgan en lo sucesivo con esta perfección..."

El 31 de agosto de 1791, Cipriano Vimercati, Director de las Academias de Guardias Marinas, firma el Prefación de la primera edición. Todo ello a pesar de que como señalase José de Mendoza a Valdés, en carta de 20 de agosto de 1791:

"No es tarea fácil la del cálculo de las Efemérides, y ni aquí, ni en Inglaterra dejan de ser raros los sujetos capaces de hacerlo con exactitud. Sin embargo, las circunstancias actuales de este país son favorables al intento..."

Desde entonces, de forma ininterrumpida se ha publicado el Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas. A lo largo de estos doscientos doce años, es decir, de estos doscientos trece volúmenes editados, se han ido presentando los trabajos, esfuerzos, estudios, sacrificios y conocimientos de todo un conjunto de observadores, calculadores y oficiales de la Armada que han dedicado muchos años de su vida a esta dura, difícil y responsable labor de suministrar a los navegantes los medios que les han permitido situarse en la mar y a los geodestas, topógrafos e hidrógrafos llevar a cabo su difícil trabajo de determinar las posiciones geográficas de los diversos

puntos que permiten y dan lugar a la representación, de la Tierra, en forma de cartas, mapas y planos. Por otra parte, las explicaciones a las Efemérides Astronómicas han constituido una guía de utilidad didáctica durante muchos años. La dilatada labor llevada a cabo por la Oficina de Efemérides es de tal importancia que, en algunos períodos, la historia del Observatorio se puede confundir con la de la Oficina misma.

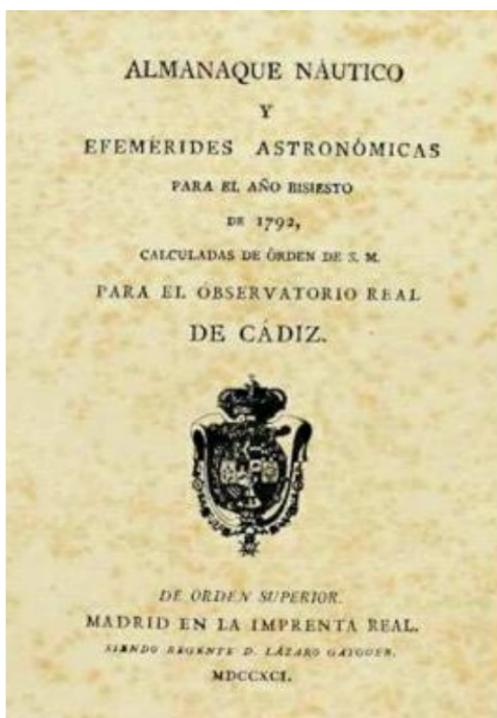


Figura 4: Portada de la primera edición del *Almanaque náutico y efemérides astronómicas*, correspondiente al año 1792.

Cabe señalar, como se indica en el prólogo de la edición del Almanaque Náutico para el año 1997, que la elaboración de los cálculos que dan como resultado el Almanaque, se desarrollan, desde ese año, mediante la utilización del método de aproximación polinómica en la norma de Tchebyshev o interpolación uniforme, basada en el uso de polinomios de ajuste que aseguran que, al sustituir la base de datos por el polinomio correspondiente, el error cometido en cualquier punto no supera un error máximo conocido y aceptado de antemano. Este procedimiento, que constituyó una auténtica primicia mundial, en cuanto a método de cálculo,

se presentó, en París, ante la Unión Astronómica Internacional (UAI) en su última reunión de trabajo del año 1996.

La Cronometría Naval en España. La Hora

Tras los éxitos alcanzados en las diferentes pruebas a que fueron sometidos los diversos prototipos de cronómetros presentados por John Harrison hacia la mitad del siglo XVIII se puede afirmar que la cronometría naval ha nacido, hecho que no pasa desapercibido de todos aquellos que están atentos a cuanto pueda estar relacionado con los avances técnicos navales. Por ello Jorge Juan propuso no sólo la adquisición de algunos cronómetros sino el envío a Londres de dos o tres relojeros españoles a aprender las técnicas del oficio con el propio Harrison.

Los primeros cronómetros navales, que entran en el Observatorio, se adquieren al famoso maestro relojero Berthoud en el año 1774, pero el disponer de personal cualificado para su limpieza, mantenimiento y, si fuese necesario, reparación no se produce hasta años más tarde.

El Observatorio, como ya se ha señalado, continuó de forma rutinaria su labor de observación astronómica para el mantenimiento de la hora de sus Péndulos Magistrales, arreglados al primer meridiano, inicialmente en Cádiz y luego después en la Isla de León, así como de los diversos cronómetros que conservó, auxiliando a los barcos en cuanto podía.

En el año 1833 el Ministerio de Marina estableció que todos los buques de guerra de más de 12 cañones llevasen a bordo, a cargo de su comandante, un quintante, un anteojo acromático, un cronómetro, un termómetro, un barómetro y una colección de cartas náuticas. Según esta disposición, al director del Observatorio le correspondía la tarea de presupuestar, adquirir y distribuir las colecciones de instrumentos que fuesen consideradas necesarias.

En el año 1844 se ordena la creación de un depósito de instrumentos en el Observatorio y, en 1868, se ordena que:

"... la adquisición de todos los cronómetros e instrumentos del servicio de los buques.... se verifique exclusivamente por la dirección del Observatorio."

En el año 1923 se inició la transmisión de señales horarias mediante señales radio, actividad que continua hasta la fecha. Con motivo del Año Geofísico Internacional se adquirieron un conjunto de relojes de cuarzo Belin, para apoyar y mejorar el trabajo astronómico de determinación de las longitudes. Desde entonces, de forma cada vez más evidente, la determinación de la hora fue trabajo más propia del físico que del astrónomo.



Figura 5: Cronómetro marino N° 39 de F. Berthoud. (Cortesía del Museo Naval, Madrid)

En el año 1971, tras instalarse en el observatorio los primeros patrones atómicos de haz de Cesio, la labor que hasta entonces desempeñaba la Sección de Astronomía, en todo lo relacionado con la hora, se le asigna a una nueva sección que entiende de la importante labor de la determinación de la hora y mantenimiento del Patrón Nacional de Tiempo.

Desde sus inicios lo lleva a cabo al máximo nivel pues, al año siguiente, 1972, entra a formar parte del grupo selecto de laboratorios de hora que participan en la generación, por parte del Buró Internacional de la Hora, del Tiempo Atómico Internacional y del Tiempo Universal Coordinado.

El resultado final es el de todos conocido: En el laboratorio de Hora del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, mediante el conjunto de patrones atómicos de haz de Cesio de que dispone y toda la instrumentación asociada, junto con los correspondientes algoritmos de cálculo de diseño propio, establece permanentemente el segundo de tiempo que constituye el Patrón Nacional de esta unidad de acuerdo con la definición del Sistema Internacional de Unidades y se establece una escala de tiempo, el Tiempo Universal Coordinado de San Fernando, UTC(ROA),

base de la Hora Legal española. Ambos, patrón y escala de tiempo, están comparados y contrastados de forma continuada con el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y participan en la generación de las escalas de Tiempo Atómico Internacional y de Tiempo Universal Coordinado.

Es de señalar que, entre sus responsabilidades, está también la diseminación de la escala. Esta labor la lleva a cabo mediante diversos procedimientos que van desde el clásico sistema de transmisión de las señales horarias vía radio, hasta las más modernas técnicas acordes con los nuevos procedimientos de comunicaciones que proporcionan las redes globales de ordenadores. Así, el Observatorio de la Armada sincroniza mediante técnicas basadas en protocolos NTP la red informática nacional IRIS, la andaluza CICA y, a través de la red IRIS, gran parte de la red informática europea.

El geomagnetismo en el Observatorio

La inclusión de, cada vez, mas elementos de hierro en los buques puso de manifiesto el grave problema de la alteración que este material producía en las agujas. En el año 1879, a resultas de lo ordenado en la Real Orden de 12 de diciembre de 1878, con la finalidad del estudio, conservación, montaje y mantenimiento de las agujas magnéticas de los buques de la armada y, por otro lado, para contribuir al estudio del campo magnético terrestre y de impulsar el control de la variación de la referencia magnética señalada en la cartografía náutica española, se instaló en el Observatorio, en un local expresamente construido para tal fin, una estación magnética de medida absoluta de la fuerza horizontal, declinación e inclinación del campo magnético y de un dispositivo de medida de sus variaciones. Podemos decir que con esta instalación y los trabajos a que dio lugar, nace en España el estudio de esta ciencia.

Desde entonces, y de forma ininterrumpida el Observatorio de la Armada ha trabajado en esta rama del saber. Los avances propios de los conocimientos han motivado diversos cambios en la instrumentación y el crecimiento de la ciudad y la electrificación de la vía férrea, han motivado el cambio de emplazamiento de la estación magnética.

Las aplicaciones de los datos de observación del campo geomagnético son muy diversas, son la herramienta fundamental para el estudio del geomagnetismo terrestre y sus variaciones temporales, labor que se lleva a cabo mediante la Red Global de Observatorios Geomagnéticos, designada INTERMAGNET, de la que forma parte el Observatorio de la Armada desde el año 1996. Igualmente, los datos obtenidos mediante los observatorios con base en tierra y por satélites artificiales especializados, permiten deducir el Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) publicado por la Asociación Internacional de Geodesia y Aeronomía (IAGA). La actual estación, que se encuentra ubicada en los terrenos de la estación

radio de la Armada, será en un futuro muy próximo trasladada a un nuevo emplazamiento que, al garantizar mayores estabilidades magnéticas, permitirá mejorar, aún más, la calidad de las observaciones efectuadas.

La sismología en el Observatorio

En 1897, y a propuesta del señor Milne, de la Asociación Británica, se instala en el Observatorio un sismógrafo, péndulo horizontal, diseñado por el propio Milne. El péndulo tenía el número 6 y llegó al Observatorio el día 17 de enero de 1898, concluyéndose su montaje el día 31 quedando en estado de pleno funcionamiento con un período de oscilación de 18 segundos. De esta forma nace para España, en el Observatorio de la Armada, una nueva rama de la ciencia: la sismología instrumental. Desde entonces, con tan sólo un breve intervalo por problemas estructurales en los cimientos de la sala de sismógrafos, el Observatorio de la Armada ha trabajado en esta ciencia.

A lo largo de los años, se han ido adquiriendo, diseñando, desarrollando y montando diversos conjuntos de sismómetros hasta llegar a la configuración actual formada por una Red Sísmica de Corto Período cuyo antecedente se remonta al año 1987, en el que se establece la Red del Estrecho por acuerdo entre la empresa estatal SECEGSA, el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y este Observatorio, a fin de estudiar la sismicidad en las zonas próximas al Estrecho de Gibraltar, por la posibilidad de un enlace fijo a través del mismo. Consta en la actualidad de 10 estaciones sísmicas y está orientada principalmente a detección y registro de la sismicidad en un ámbito más regional: SW de Andalucía, zona oriental del Golfo de Cádiz, zona occidental del mar de Alborán y norte de Marruecos. Hasta la actualidad se han detectado más de 6.000 terremotos en la zona desde la fecha de instalación de la red. Complementando a esta red, junto a una Estación sísmica de Largo Período instalada en el recinto del Observatorio, se dispone también de una Red de Estaciones de Banda Ancha formada por cuatro estaciones de última generación, situadas en San Fernando, Cartagena, Mahón y Melilla. Su despliegue se inició en Julio de 1996 merced a un convenio de colaboración entre el Observatorio, la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y el Geoforschung Zentrum (GFZ) de Postdam (Alemania), y por su avanzada tecnología permite la detección y adquisición de terremotos acaecidos tanto a nivel local como regional o global. Permite su acceso vía módem telefónico, se encuentra integrada dentro de la red de este Observatorio y está asociada a la red mundial GEOFON y vía ella a otras redes mundiales como ORFEUS, IRIS, etc. Asimismo, todas ellas participan en la actualidad en el proyecto europeo MIDSEA coordinado por el Instituto ETH de Zurich (Suiza).

La Era espacial

El día 4 de octubre de 1957, el mundo se conmocionó con la sorprendente noticia de que la Unión Soviética habían lanzado al espacio un satélite artificial, el Sputnik I, que orbitaba alrededor de la Tierra.

Cuatro meses más tarde, en el mes de febrero de 1958, tras establecerse un acuerdo con la Smithsonian Institution, se instaló en los terrenos del Observatorio una cámara fotográfica Baker-Nun, capaz de fotografiar los satélites artificiales sobre el fondo de las estrellas lo que, en unión de la hora de observación, permitía la determinación de la posición del satélite con una incertidumbre de 14 metros. Nace así la primera estación de seguimiento de satélites de Europa, siendo el primer satélite observado el Sputnik III. Con ella, el Observatorio ha participado en los 21 primeros años de la era espacial.

Hoy en día esta estación es sólo un recuerdo; su trabajo ha sido reemplazado por la actividad de la estación láser instalada en la cúpula del edificio principal. Esta estación, código internacional 7824, única en la Península Ibérica y Norte de África, se encuentra integrada en la red europea EUROLAS de estaciones láser y es miembro del "Servicio Internacional de Estaciones Láser" (ILRS).

Desde el año 1996, y merced a la financiación facilitada por el Ministerio de Defensa, el de Ciencia y Tecnología y por la Agencia Espacial Europea (ESA), la estación está siendo sometida a un continuado proceso de modernización que ha permitido pasar, en un período de unos 5 años, de una estación láser que estaba limitada en su seguimiento a satélites bajos (500-600 km de altura) y solamente en períodos nocturnos, con precisiones que estaban por encima de los 10 cm y un número total de seguimientos de satélites que no alcanzaba los mínimos marcados por la red EUROLAS, a una estación que efectúa seguimiento de forma sistemática tanto de satélites bajos como medios (6.000 km), tanto en períodos nocturnos como diurnos y con una precisión que está por debajo de los 3 cm. Esto ha permitido que, desde el año 1997, esta estación láser fuera incluida dentro del grupo de estaciones que participan en la definición del "Sistema Terrestre de Referencia Internacional (ITRF) generado por la Asociación Internacional de Geodesia" (IAG). En estos momentos, se está abordando la siguiente fase del desarrollo que conducirá al seguimiento de satélites altos (30.000 km) y mayores precisiones.

Conviene destacar que el Seguimiento Láser de Satélites Artificiales es una de las cuatro técnicas fundamentales en Geodesia, junto con la Interferometría de Larga Base (VLBI), el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y el Sistema DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). No obstante, la técnica Láser de Seguimiento de Satélites, integrada por tan sólo unas 40 estaciones a nivel mundial, es de importancia fundamental por ser el único medio de:

- Medir la variación temporal del campo gravitatorio terrestre.
- Definir un sistema de referencia geocéntrico con precisión en el orden de milímetros.
- Ser el único sistema capaz de seguir el movimiento vertical en un sistema de referencia absoluto.
- Detectar redistribuciones de masa de gran escala en el interior de la Tierra, océanos y atmósfera.

Las actividades relacionadas con esta estación láser tienen una gran repercusión, fundamentalmente a nivel internacional puesto de manifiesto en la continua colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), la NASA, la Agencia Espacial Italiana (ASI) y numerosos Observatorios

Paralelamente a las actividades relacionadas con satélites, ya señaladas, conviene recordar que desde el nacimiento, a principios de la década de 1980, del GPS como técnica de aplicación civil en geodesia, fue incorporado a este Observatorio, dentro de su servicio de satélites, mediante la adquisición y puesta en funcionamiento de equipos geodésicos de observación GPS, primeros equipos en España de dichas características.

Con ellos el Observatorio ha participado en diversas campañas, destacando de entre ellas las Campañas Geodésicas Antárticas, Campaña de Referenciación Europea EUREF'89, EPOCH'92, Campaña de Referenciación de la Península Ibérica IBERIA'95, Campañas Geodésicas 1994, 96, 98 y 2002, Campañas Internacionales TANGO 1993, 95, 98, 2000, 2001, etc.

Desde entonces y hasta la actualidad el Observatorio ha desplegado diversas redes de observación GPS, de entre ellas cabe señalar:

Red GPS Antártica: desplegada en las cuatro primeras campañas antárticas de 1987 a 1991, con vértices localizados en las Islas Decepción y Livingston, y vértices adicionales en Argentina (Tierra de Fuego), Península Antártica, etc. En las campañas posteriores de 1995/96 y 1999/00 y 2001/02 esta red fue reobservada y densificada con vértices adicionales.

Red geodinámica GPS Andalucía-Norte de África: Establecida en el año 1994, con la finalidad de estudiar las deformaciones geodinámicas producidas en la corteza terrestre por la convergencia de las Placas Tectónicas Euro-Asiática y Africana, en la región Sur de España-Norte de África, con diez vértices localizados en puntos de Andalucía, Ceuta y Melilla

Estación permanente de Referencia: Instalada en el año 1995 en el recinto del Observatorio, es incluida en el año 1996 dentro de la

red global de estaciones fundamentales IGS de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) que constituye el marco de referencia global de todo el sistema terrestre GPS.

Red GPS permanente: Consta de cuatro estaciones, instaladas en Cartagena, Mahón, Melilla y Granada, con el fin de tener una representación continua de la convergencia antes citada entre Eurasia y África.

Todas las actividades que en el campo de las aplicaciones geodésicas del GPS se están realizando, tienen una repercusión tanto a nivel nacional como internacional, manteniéndose estrechas colaboraciones con numerosas instituciones y universidades.

La meteorología en el observatorio

A medida que se fue desarrollando la astronomía en el Observatorio, surgió en paralelo la necesidad de tomar datos meteorológicos, con la finalidad de aplicar correcciones a las medidas astrométricas mediante modelos de refracción atmosférica. Aunque las medidas pluviométricas se extienden en su registro a 1811, los datos meteorológicos se empezaron a publicar de forma secuencial e ininterrumpida desde la aparición de los *Anales del Instituto y Observatorio de Marina de San Fernando* en 1870, siendo la serie meteorológica de San Fernando la más extensa de toda España, y una de las más extensas a nivel global. Asimismo, este observatorio fue el encargado de organizar y gestionar en su primera época el llamado Servicio Meteorológico Costero, que con el tiempo derivaría en el actual Instituto Nacional de Meteorología. Le cabe, por tanto, a este Observatorio el honor y el derecho de reseñar que es el iniciador de esta ciencia en España.

La Escuela de Estudios Superiores

El campo de la docencia, uno de los tres elementos básicos de la propuesta fundacional del Observatorio formulada por Jorge Juan, se ha mantenido viva a lo largo de los años. Heredera de aquella idea es la actual Escuela de Estudios Superiores en Ciencias Físico-Matemáticas de la Armada que se identifica en sus orígenes, por un lado, con la propia Enseñanza Naval Militar (Compañía de Guardias Marinas), y, por otro lado, con las primeras prácticas de la Astronomía Náutica en España (Observatorios Astronómicos).

En la Compañía de Guardias Marinas, creada en Cádiz en 1717, con el fin de formar a los futuros Oficiales de Marina, y en las escuelas, posteriormente creadas, de Ferrol y Cartagena, se impartía un curso de Estudios Mayores bajo la dirección y enseñanza de los Directores de las Academias; a este curso asistían Guardias Marinas y Oficiales destacados.



Figura 6: Biblioteca del Real Observatorio de la Armada en San Fernando.

Años más tarde, en 1773, Tofiño y Winthuysen propusieron escoger anualmente a un pequeño grupo de cadetes para potenciar su formación. Esta propuesta se cristaliza diez años después cuando por la R. O. de 29 de mayo de 1783 los oficiales José de Espinosa, Alejandro Beluzonti, Julián Ortiz Canelas y José Vargas Ponce quedaban destinados en el Observatorio bajo la responsabilidad de Vicente Tofiño, director de la Academia quién redactó los métodos de estudios y tareas asignadas a los citados oficiales.

Esta iniciativa se repitió durante diversas etapas hasta que en 1836 se publicó un R. D. por el que se establecía en San Fernando una cátedra de Estudios Mayores.

Por R. O. De 16 de septiembre de 1856 se estableció un curso de Estudios Superiores de matemáticas puras, física y astronomía en el Observatorio de Marina, bajo el mando de su director. El día 1 de enero de 1857 se inauguró el primer curso de Estudios Superiores. Desde esa fecha, con diversos altibajos y periodos de inactividad, continúan impartándose los cursos.

En 1945, en la Ley de 15 de mayo, por la que se reestructura el Observatorio, se le reconoce a la Escuela de Estudios Superiores el rango de Enseñanza Superior, cubriendo sus Diplomados, fundamentalmente, puestos de Investigación y Profesorado en la Armada.

Para la adecuada formación y puesta al día de los miembros del Observatorio se fueron adquiriendo numerosos libros y revistas técnicas

que, con el transcurso de estos 250 años, ha alcanzado un volumen próximo a los 30.000 títulos y que, por sus características, está considerada como una de las mejores bibliotecas técnicas de España, especialmente en Matemáticas y Astronomía.

Conclusión

Al recorrer las salas del edificio principal que alberga la biblioteca y el conjunto de instrumentos que ha sabido conservar, el visitante puede llegar a la conclusión de que el Observatorio es un museo y por lo tanto historia. La realidad es bien distinta.

Ser el Observatorio astronómico más antiguo de España es historia. Ser el único observatorio español que trabaja en astronomía meridiana, con instrumentos de última generación, y que participa de forma activa en la elaboración de catálogos astrométricos relevantes, es ciencia viva.

Generar el Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas desde el año 1791 es historia. Seguir generándolo con las mayores precisiones, es ciencia. Trabajar en Mecánica Celeste, tanto de cuerpos celestes como de satélites artificiales, y presentar sus resultados en congresos nacionales e internacionales es vivir la ciencia actual.

Ser los iniciadores en España de las ramas científicas de Geomagnetismo (1879), Sismología (1898), Satélites artificiales (1958) o Meteorología (1811) es, igualmente, historia. Trabajar con la única estación láser española de seguimiento de satélites, mantener redes geodésicas GPS, esforzarse en la modernización y mejora de sus redes sísmicas y su estación magnética, seguir suministrando datos meteorológicos a la red nacional, participar en diversos programas de investigación y presentar sus resultados en congresos científicos, es ciencia viva. Trabajar, desde los orígenes del centro, en la medida, determinación y diseminación de la Hora, puede ser historia. Ser el responsable del mantenimiento del Patrón Nacional de Tiempo y de la Hora Legal española, colaborar con El Buró Internacional de Pesas y Medidas en el establecimiento del Tiempo Atómico Internacional y del Tiempo Internacional Coordinado eso, sin lugar a dudas, es ciencia viva.

Todo este conjunto de actividades ha mantenido vivo al Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando que, tras estos CCL años que ahora celebra, se encuentra pujante para afrontar con renovada ilusión los retos científicos que el siglo XXI presenta.

No sería justo finalizar sin recordar a todos que cuanto ha significado y significa el Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, que nació como Real Observatorio de Cádiz, se debe al cariño y atención que la Armada supo prestarle en todo momento y a la labor continua y esforzada de todos cuantos han trabajado y trabajan en él.

Bibliografía

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

A. Lafuente y M. Sellés *El Observatorio de Cádiz (1753-1831)* Ministerio de Defensa, Madrid (1988)

Véase también: <http://www.roa.es>