

UNA FORMA DE TÉCNICA REFINADA EN LA CIVILIZACIÓN ÁRABE

David A. King
Johann Wolfgang Goethe University
Frankfurt am Main

NOTAS PRELIMINARES

Han sobrevivido cerca de mil instrumentos científicos «medievales» del mundo islámico (750-1900) y de la Edad Media europea (950-1500). Los artesanos musulmanes, algunos de los cuales eran astrónomos profesionales, nos dejaron algunos instrumentos particularmente notables en cuanto a originalidad y competencia, y sus equivalentes europeos fueron altamente deudores de sus predecesores musulmanes. Las inscripciones y la decoración de estos instrumentos constituyen claves importantes para entender su contexto histórico y para establecer su autenticidad cuando es puesta en duda.

Lo que nos concierne aquí tiene que ver principalmente con los instrumentos islámicos, si bien tendremos en cuenta algunos europeos inspirados por sus precursores islámicos. La instrumentación constituía un aspecto significativo de la astronomía islámica, particularmente de los marcadores de tiempo astronómicos. Además, estos *objetos de arte* constituyen un corpus sustancial de la metalistería islámica, hasta ahora muy descuidada respecto a su potencial contribución a la historia del arte. Un pequeño grupo de instrumentos servía para todas las latitudes y proporcionaba soluciones «universales» a problemas de astronomía esférica, tema seguido con singular entusiasmo por los astrónomos musulmanes a lo largo



de varios siglos. Asimismo los instrumentos individuales reflejan las predilecciones de las escuelas regionales de astronomía, donde se construían o perfeccionaban. Y finalmente, pero no menos importante, el relato del modo en que algunos han llegado hasta nosotros, en los raros casos en que esto se conoce, o cómo han sobrevivido a las vicisitudes del siglo XX, resulta con frecuencia de un interés considerable.

A. APUNTES GENERALES SOBRE INSTRUMENTOS

1. Las fuentes para la historia de la instrumentación astronómica islámica y la situación del arte

Nuestro conocimiento sobre la instrumentación astronómica en el mundo islámico entre los siglos VIII y XIX deriva esencialmente de dos fuentes principales:

- a) los instrumentos conservados en varios museos y colecciones privadas alrededor del mundo
- b) los tratados sobre construcción y uso de instrumentos que se conservan en forma de manuscrito en bibliotecas, sobre todo en Europa y el mundo musulmán.

Los instrumentos islámicos que han sobrevivido son muchísimos: unos 600 astrolabios, cerca de 150 globos, unas cuantas docenas de cuadrantes y otras cuantas de relojes de sol, aunque muchos son posteriores al creativo período de ciencia islámica que duró desde el siglo VIII al XV. Sobreviven docenas de tratados y no pocos fueron recopilados durante el primer período de la ciencia islámica. Asimismo, algunos describen instrumentos de los que no hay ejemplos que hayan perdurado, pero que son mucho más interesantes que el astrolabio estándar, que el cuadrante o el reloj de sol. Habrá que desenterrar todavía bastantes manuscritos de las diversas colecciones no catalogadas sobre manuscritos científicos árabes, persas y turcos, particularmente de bibliotecas de Turquía, Irán y la India.

En el siglo XIX los orientalistas comenzaron a descubrir los instrumentos islámicos y se llevaron a cabo algunos de los mejores estudios que han aparecido sobre la materia. Nuestro conocimiento de los logros musulmanes en instrumentación astronómica adquirió un enorme impulso con la publicación en 1932 de *Astrolabios del mundo*, de Robert Gunther, basada sobre todo en los instrumentos actualmente acogidos en el Museo de Historia de la Ciencia de Oxford, que todavía hoy constituye la colección más extensa e importante del mundo. Pero Gunther no era un arabista y tuvo problemas con las inscripciones de los astrolabios islámicos que examinó, lo que dio lugar a ciertas consecuencias desafortunadas. Lamenta-



blemente su trabajo nunca ha sido corregido ni actualizado. Numerosos escritos del XIX –y de principios del XX– sobre instrumentos islámicos dispersos en publicaciones especializadas están ahora disponibles en forma de reimpressiones en seis abundantes volúmenes. Los catálogos de colecciones individuales sobre instrumentos islámicos son pocos y distantes. En 1956 Leo A. Mayer publicó un provechoso estudio sobre constructores musulmanes de instrumentos. Por lo general existe cierto interés erudito y popular en esta materia, mucho del cual debe atribuirse a la perspicacia y ambición de Derek de Solla Price, quien hacia 1970 estableció la importancia de recopilar todos los astrolabios islámicos y europeos conocidos (unas tres veces las trescientas y tantas piezas conocidas por Gunther). El primer estudio de Emilie Savage-Smith sobre globos celestes islámicos fue publicado en 1985 y el largamente esperado repertorio de astrolabistas islámicos y sus trabajos aparecerá en breve de manos de Alain Brioux y Francis Maddison. Yo mismo estoy intentando compilar un catálogo de astrolabios islámicos (y también europeos), cuadrantes y relojes de sol de hasta 1500, pero este es otro proyecto a largo plazo.

2. Las nociones astronómicas básicas

Para entender la función de estos instrumentos conviene considerar el firmamento como fijo en una esfera respecto al observador que gira en relación a su horizonte sensible. La esfera celeste gira alrededor de un eje celeste, una vez cada 24 horas. La altitud del polo norte celeste sobre el horizonte es la misma que la latitud del lugar en la esfera terrestre. El meridiano celeste es el círculo máximo que pasa a través del polo celeste y del cénit, el punto que se halla directamente sobre el observador; el meridiano, círculo máximo que pasa por el cénit y el polo celeste, define los puntos Norte y Sur en el horizonte sensible. Los puntos Este y Oeste son definidos por el círculo máximo perpendicular, llamado círculo vertical primario. El ecuador celeste es el círculo máximo perpendicular al eje celeste, y pasa a través de los puntos Este y Oeste del horizonte. Los cuerpos celestes parecen atravesar el cielo en pequeños círculos paralelos al ecuador celeste. Su altitud sobre el horizonte y su dirección alrededor del horizonte, llamada azimut, pueden medirse directamente a través de la observación.

El sol parece moverse contra el fondo de las estrellas fijas durante el curso de un año: su trayectoria, llamada eclíptica, está inclinada respecto al ecuador celeste en un ángulo de unos $23^{\circ}27'$ y se llama oblicuidad. Este ángulo disminuye perceptiblemente a lo largo de los siglos. La Luna y los planetas parecen moverse a lo largo de la eclíptica (en dirección opuesta a la de la aparente rotación diaria de la esfera celeste), pero a diferencia del Sol, también vagan de un lado a otro de



ella. Para hallar las posiciones del sol sobre la eclíptica o de la luna y los planetas con respecto a ésta, los antiguos desarrollaron modelos matemáticos aritméticos o geométricos. Las llamadas estrellas fijas se mueven en paralelo a la eclíptica de modo perceptible a lo largo de los siglos con un movimiento conocido como precesión. Era necesario determinar sus posiciones para una época específica y actualizar los catálogos de estrellas de vez en cuando. Las coordenadas celestes se medían o con respecto a la eclíptica (longitud y latitud) o con respecto al ecuador celeste (ascensión recta y declinación).

Conociendo la posición del cuerpo celeste en un sistema de coordenadas celestes y pudiendo medir su posición respecto al horizonte podemos determinar el tiempo, en unidades fraccionarias del intervalo día-noche, definido como 24 horas o como 360° . En la Edad Media, como en la Antigüedad, el tiempo también se medía en horas estacionales, doce divisiones de la duración del día o de la noche; estas horas estacionales tienen la desventaja de que varían de una latitud a otra y cambian de amplitud a lo largo de todo el año (véase más abajo). También se puede determinar las intersecciones instantáneas de la eclíptica con el horizonte y el meridiano, dividir la eclíptica en las llamadas «casas» y averiguar qué planetas se hallan en cada casa: tales configuraciones se idearon por quienes querían tener alguna influencia en asuntos terrenales.

3. Una clasificación de los instrumentos islámicos medievales

Conviene distinguir entre dos grandes categorías de instrumentos islámicos, a saber, «observacionales» y «no observacionales». Aquellos instrumentos utilizados por los astrónomos musulmanes para las observaciones seguían de cerca la tradición de los aparatos descritos por Ptolomeo de Alejandría hacia el 140 a.n.e.: la esfera armilar, representación material de círculos específicos astronómicamente significativos en la esfera celeste, como el horizonte, el meridiano, el ecuador celeste y la eclíptica; el cuadrante mural, para medir las altitudes meridianas de los cuerpos celestes; y la regla paraláctica, para medir la distancia cenital de un cuerpo celeste.

Los instrumentos cuya función primaria no era observacional son principalmente para solucionar problemas de astronomía esférica, la matemática de las configuraciones en la esfera celeste respecto al observador. Los mayores problemas están relacionados con la determinación del tiempo, utilizando o bien los ortos y ocasos del Sol y las estrellas sobre el horizonte sensible o sus culminaciones a lo largo del meridiano local y una altura observada. Estos problemas son esencialmente problemas de conversión de coordenadas entre sistemas diferentes: el basado en el horizonte (con coordenadas de altura y azimut respecto a una



latitud terrestre específica), el ecuatorial (declinación y ángulo horario) y el eclíptico (latitud y longitud celestes). Así por ejemplo, si se mide la altura del Sol en un día en que se conoce la declinación solar y la latitud local, se puede deducir el ángulo horario y el azimut. Esta clase de instrumentos incluye:

1) La esfera celeste: un modelo del universo donde el sol y las estrellas están representados en una esfera que puede girar en torno al eje celeste, de modo que los ortos y ocasos pueden ser simulados sobre cualquier horizonte.

2) El «computador analógico», conocido como astrolabio para representar —en dos dimensiones mejor que en tres— las posiciones del Sol y de las estrellas fijas respecto al horizonte sensible, midiéndose el paso del tiempo por la amplitud de la rotación entre dos posiciones dadas.

3) Las tablas matemáticas como el cuadrante de senos para obtener soluciones numéricas a problemas de trigonometría sin necesidad de cálculo.

4) Relojes de sol y otros aparatos para medir la hora del día mediante sombras.

5) El equatorium: un artilugio para determinar las posiciones planetarias según modelos geométricos de tipo ptolemaico para el Sol, la Luna y los cinco planetas visibles.

Con la excepción de las tablas trigonométricas y de numerosos instrumentos de la índole de los cuadrantes, estos instrumentos eran conocidos por los musulmanes a través de fuentes griegas. De cualquier modo, lo que los astrónomos musulmanes hicieron con ellos constituye un capítulo singularmente vivido en la historia de la astronomía.

4. Tratados sobre instrumentos

Abundan los tratados sobre construcción y uso de diversos instrumentos, pero sólo unos pocos han sido publicados. Algunos tratan sobre variedades de instrumentos de los que no ha sobrevivido ningún ejemplar. Los dos tratados islámicos principales sobre los aspectos de instrumentación eran:

1) El *Kitab al- Mabadi wa'l- ghayat fi'l- miqat*, que significa algo así como *La medición del tiempo astronómico de la A a la Z*, del astrónomo magrebí Abu Alí al-Marrakushi (El Cairo, 1280 aprox.), que se ocupa de todos los instrumentos estándar de su tiempo e incluyendo un detallado estudio de astronomía esférica con numerosas tablas, al igual que una serie de textos escogidos de las primitivas fuentes sobre el uso de diversos instrumentos. La primera mitad de este tratado y un resumen de la segunda fue publicada en traducción francesa por los Sédillot padre e hijo en París a mediados del XIX; no obstante, la obra merece un nuevo estudio.



2) Un tratado anónimo y sin título que puede atribuirse a Najm al-Din al-Misri (El Cairo y Alepo hacia 1300), donde describe todos los instrumentos raros que conocía y todos aquellos inventados por él mismo. Este tratado, descubierto en 1982 en un manuscrito de la Biblioteca Chester Beatty (Dublín) se halla lleno de sorpresas y actualmente se está preparando su edición, traducción e interpretación.

Otro trabajo importante, fundamentalmente dedicado a la construcción del astrolabio, *al-Isti'ab fi wujuh sina'at al-asturlab*, de al-Biruni (Ghazna, principios del S.XI) se halla todavía inédito, por desgracia. Al-Biruni sigue parcialmente a su maestro al-Sijzi, quien estaba familiarizado con los adelantos en Bagdad durante los siglos IX y X. Véase más abajo otras obras que incidieron en la instrumentación, realizadas por personalidades como Habash al-Hasib (Bagdad, s.IX) y Abu Ja'far al-Khazin (Bagdad, s.X).

5. Escuelas de instrumentación astronómica

Las contribuciones más importantes en instrumentación fueron realizadas por individuos que trabajaban solos. Como lumbreras en este campo cabe citar a Hamid ibn Alí al-Wasiti de Bagdad y Hamid ibn Khidr al-Khujandi de Rayy (¿también Bagdad?), en el siglo IX, Alí ibn Khalaf y al-Zarqallu en el siglo XI, ambos activos en Toledo, y Ibn al-Sarraj que trabajó en Alepo en el siglo XIV. Había escuelas de constructores de instrumentos, con frecuencia formadas por varias generaciones de la misma familia y que funcionaban en las siguientes capitales:

1) Bagdad durante los siglos XIII y XIV. Gracias a Ibn al-Nadim tenemos los nombres de las personas (incluyendo una mujer) más importantes implicadas en el tema y, por fortuna, algunos de sus instrumentos, de los que destacan los de Nastulus y al-Wasiti (ver sección B1). Además, el espléndido astrolabio de al-Khujandi se construyó para usarse en Bagdad, que en el siglo XII volvió a ser importante en la instrumentación, sobre todo con Hibatallah (véase B10) y sus seguidores.

2) Varios centros en al-Andalus en el siglo XI (tenemos una docena de instrumentos) y especialmente Córdoba y Toledo en ese mismo siglo para los astrolabios universales y placas (de estos tenemos textos, pero no instrumentos).

3) Isfahan desde el siglo XI al XIII. Conservamos bastantes instrumentos, especialmente los de Hamid ibn Mahmud al-Isfahani y su hijo Muhammad ibn Abi Bakr al-Ibari.

4) Marrakesh y Sevilla a principios del siglo XIII: véanse los numerosos instrumentos de Abu Bakr ibn Yusuf y al-Khama'iri, respectivamente, y sus muchos imitadores en los siglos posteriores.



5) Damasco y El Cairo en el siglo XIII, de ahí los espectaculares y monumentales instrumentos de Abd al-Rahman ibn Sinan al-Ba'labakki y 'Abd al-Karim al-Misri.

6) El norte de Irán y Asia central en los siglos XIV y XV. Tenemos no pocos instrumentos de la familia al-Kirmani, siendo los más importantes los de Muhammad ibn Ja'far al-Kirmani, conocido como Jalal (ver sección B5).

7) Granada en el siglo XIV, representada por el equipo Ibn-Baseo padre e hijo; sobrevive un tratado del padre y varios instrumentos del hijo.

8) Damasco en el siglo XIV: varios instrumentos raros, especialmente los de Ibn al-Shatir (ver sección B12-13) y también al-Mizzi, además de numerosos tratados.

9) Lahore desde el siglo XVI hasta el XVIII, empezando por Mawlana Maqsur Harawi y luego principalmente una familia descendiente de Allah-dad (o Ilah-dad), por lo general más audaces que sus colegas en Isfahan, que incorporaron numerosas características ya conocidas por nosotros a través de una tradición textual mucho más temprana.

10) Isfahan (y también Meshed) desde el siglo XVII hasta el XIX. Varios astrolabistas prolíficos, todos artesanos competentes con capacidad estética, pero no particularmente novedosos desde un punto de vista científico (no obstante, ver sección B14), incluyendo a Muhammad Muqim Yazdi, Muhammad Zaman Mashhadi, Muhammad Mahdi, Muhammad Khalil, 'Abd al-'Ali, Muhammad Tahir, Muhammad Amin y 'Abd al-'Imma.

11) Estambul desde el siglo XVI hasta el XIX: numerosos cuadrantes tardíos disponibles; sorprendentemente pocos astrolabios.

12) Marrakesh y Mequinez desde el siglo XVII (?) al XIX, especialmente el prolífico al-Battuti, sobre el 1700.

Teniendo en cuenta estos antecedentes pasaremos ahora a algunos instrumentos de peculiar significación histórica, muchos de los cuales únicamente han sido estudiados en los últimos 20 años.

B. ALGUNOS EJEMPLOS DE INSTRUMENTOS ISLÁMICOS

1. Los astrolabios islámicos más antiguos que han perdurado

A fines del siglo X Ibn al-Nadim afirmó que los musulmanes entraron en contacto con el astrolabio en Harran. Añadió que el primer musulmán que construyó un astrolabio fue el astrónomo del siglo VIII al-Fazari. Lamentablemente no tenemos ningún astrolabio realizado por al-Fazari, pero hay uno que podría datarse a principios del siglo IX, si no del VIII: se conserva en el Museo Arqueológico de



Bagdad y tiene la firma de un otomano llamado Ahmad ibn Kamal. La información obtenida de una descripción de alrededor de 1950, junto a las paupérrimas ilustraciones, basta para establecer que este es el astrolabio islámico conocido más antiguo, en parte reformado por un artesano otomano. Algunas de las inscripciones *cúficas* originales son todavía visibles. Además, los nombres de las estrellas *naskhi* otomanas en ocasiones hacen referencia a estrellas erróneas: durante el período de casi mil años entre el tiempo en que esta pieza se hizo y el momento en que se reformó, las posiciones de las estrellas habían cambiado tanto que el otomano confundió algunas estrellas en el reticulado con las que tenían que haber estado en esas posiciones en un reticulado de su propia época. El sencillo diseño de este reticulado, que no se encuentra en ningún otro astrolabio islámico, es idéntico al único astrolabio bizantino que ha subsistido, fechado en 1062 y considerablemente más grande. Incluso la selección de las estrellas es idéntica. Además, este es el único astrolabio islámico oriental que tiene placas para cada uno de los siete climas geográficos de la Antigüedad. Claramente, este astrolabio precede a todos los demás astrolabios islámicos primitivos que han sobrevivido (ver abajo), e incluso puede preceder a la época de mayor actividad de los astrónomos de al-Ma'mun a principios del siglo IX, cuando los musulmanes tenían el control total de la construcción y el uso del astrolabio estándar. En cualquier caso es un objeto de una importancia histórica considerable.

Ibn al-Nadim también elaboró una lista de los artesanos musulmanes conocidos por él desde el siglo VIII hasta su tiempo. Han sobrevivido unos pocos astrolabios salidos de las manos de algunos de estos artesanos, que dan testimonio de un diseño sencillo modificado a partir del diseño estándar bizantino y de los cambios y marcas adicionales que se añadieron a los instrumentos, principalmente en el siglo IX. Estas modificaciones incluían una placa de horizontes para todas las latitudes, diversas clases de escalas que muestran longitudes de sombra correspondientes a una gama de alturas solares, varias clases de redes trigonométricas para facilitar operaciones con senos y cosenos, y dos clases de marcas en forma de cuadrante para hallar el tiempo a partir de la altura solar, bien de manera exacta para una latitud específica o bien de modo aproximado para todas las latitudes.

2. Un astrolabio que sobrevivió a la guerra del Golfo

Un astrolabio espectacular, 'la pieza más sofisticada que ha sobrevivido del período islámico más temprano, lleva la firma del distinguido astrónomo Hamid ibn al-Khidr al-Khujandi, con fecha de 984/85. En 1990 su dueño huyó de Kuwait con esta pieza en su bolsillo; el resto de sus instrumentos astronómicos fue robado por las tropas iraquíes y aún no han sido recuperados. No sólo encontramos en



este instrumento todas las innovaciones mencionadas en los tratados sobre el astrolabio de los siglos IX y X –como por ejemplo, un cuadrante horario para la latitud de Bagdad y placas para determinar las casas astrológicas– sino que además es un objeto de exquisita belleza. Tiene algunos diseños zoomórficos en el reticulado así como un cuadrifolio, generalmente considerado como un motivo específicamente europeo medieval. Es evidente que Al-Khujandi construyó otros instrumentos, que establecieron una tradición altamente influyente en la instrumentación posterior, sobre todo en Irán, aunque no sólo allí, ya que incluso hay un espectacular astrolabio francés medieval que mantiene un fuerte parecido en su diseño y decoración con el de al-Khujandi.

3. Un astrolabio construido por un Sultán

Hay un astrolabio en el Museo Metropolitano de Arte de Nueva York que lleva la firma del sultán yemení al-Ashraf y data de 1291. En los años 50 del siglo XX se afirmó que era una falsificación: ningún sultán yemení pudo construir un astrolabio, como mucho la pieza debió ser hecha en Egipto. Pero más recientemente se han estudiado alrededor de cien manuscritos astronómicos yemeníes. Uno de ellos era una copia de un libro del mismo al-Ashraf, que trata sobre la construcción del astrolabio, el reloj de sol y el compás magnético (ver sección B13); se exhibe en una preciosa holografía en El Cairo, con una copia de ella en Teherán. Al final hay dos apéndices de dos maestros de al-Ashraf aprobando varios astrolabios hechos por él, uno de los cuales puede ser identificado como el instrumento que está ahora en Nueva York. El astrolabio está competentemente realizado pero es de la variedad estándar. Lo más importante es que su contexto histórico ha sido firmemente establecido.

4. Astrolabios fabricados para turistas

Una de las raras características de aquella pieza yemení es el uso de ambos tipos de numerales, los alfanuméricos y los indo-árabigos, en la escala exterior del borde frontal. En 1989 el Deutsches Schiffahrtsmuseum de Bremerhaven me envió fotos de un astrolabio que les había sido ofrecido por un capitán de barco alemán que lo había adquirido en Bombay. Les sugerí que le dijeran al capitán que lo devolviera a La India y recuperara su dinero, lo que aparentemente hizo. Seis meses después, un piloto de Lufthansa me trajo precisamente el mismo instrumento a Frankfurt; también lo había conseguido en Bombay. No es una falsificación moderna carente de atractivo, y en la escala exterior tiene ambos numerales:



alfanuméricos e indo-arábigos. De hecho, fue construido en Nueva Delhi en los últimos 80, posiblemente por alguien que seguro que había visto alguna ilustración del astrolabio de al-Ashraf, aunque el diseño del reticulado es magrebí y otras características son iraníes. Hace unos pocos años, otra linda falsificación de astrolabio estaba en oferta por 75.000 en Fez, y fue comprada –aunque no sé si por ese precio– por alguien que luego se la endosó a Christie’s y a Sotheby’s en Londres. Christie’s me envió fotos y les dije que era falso. Algunas semanas después, justamente el día que me encontraba en Sotheby’s examinando unas cuantas docenas de astrolabios islámicos supuestamente falsos por ver si entre ellos había alguna joya, llevaron allí el mismo instrumento para evaluarlo. El portador –ya «mazlum» después de su visita a Christie’s–, se fue de Sotheby’s «mazlum khalis». La pieza lleva una inscripción con una dedicatoria a Ibn Battuta, fechada convenientemente para que éste pudiera haberla traído consigo en su magno viaje. Pero la mayor parte de estas falsificaciones son fácilmente reconocibles y hay un montón de instrumentos genuinos que requieren nuestra atención con urgencia.

5. Un astrolabio hecho para un príncipe

Se conserva en Copenhague un elegante astrolabio que data de 1426-27 y lleva la firma de un tal Jalal al-Kirmani, ya conocido por algunos otros instrumentos. Una inscripción que mencionaba el nombre de un gobernante ha sido deliberadamente borrada, pero podemos decir de quien se trataba. Hay unas marcas especiales en el instrumento para encontrar la qibla en Samarcanda y Herat. El soberano que alternaba entre esas dos ciudades en esa época fue el príncipe Ulugh Beg, por entonces gobernador de Khurasan y Mazandoran, y un astrónomo posterior mencionó a Jalal al-Din al-Asturlabi como el artesano del observatorio de Samarcanda. ¿Quién borró el nombre de su patrón? Ulugh Beg, siendo sultán de Transoxania y Khurasan, fue asesinado por su único hijo, que tenía también intereses astronómicos, así que por lo menos sabemos de alguien que no le tenía mucha simpatía. Por desgracia el astrolabio no muestra ninguna gran abolladura, ni tampoco el cráneo de Ulugh Beg. Sus restos mortales atestiguan que murió por una herida de cuchillo.

6. El astrolabio más sofisticado del mundo

Un espectacular astrolabio universal firmado por Ibn al-Sarraj en 1328-29 (que se conserva en el Museo Benaki de Atenas) revela cuán poco sabemos sobre la evolución de la construcción de instrumentos y sobre la transmisión de ideas



científicas en el mundo medieval musulmán. Ya Gunther había quedado deslumbrado por esta pieza, subrayando que «*si este instrumento, que no hemos examinado, es todo él de un período, constituye un importante y precoz ejemplar*». Actualmente en la Biblioteca Nacional egipcia hay un manuscrito de un tratado de Ibn al-Sarraj sobre el astrolabio universal, sin ninguna indicación de que prácticamente éste sea el mismo instrumento descrito por el astrónomo andalusí Alí ibn Khalaf en el siglo XI. Sin embargo, el astrolabio universal de Benaki está mucho más desarrollado que el estándar descrito en cualquiera de ambos tratados: contiene un juego de placas que sirven para otras funciones universales y un reticulado universal con una escala diametral no uniforme al dorso. El misterio de cómo se usaban fue resuelto por el astrónomo egipcio de mediados del siglo XVI al-Wafa'i, quien fue dueño del instrumento Benaki (su nombre está grabado junto a los de sus otros tres propietarios en el borde exterior). En el tratado de al-Wafa'i se afirma que Ibn al-Sarraj no había aportado un tratado sobre su uso, cosa que haría él mismo. Al-Wafa'i describió las cinco maneras diferentes en que los varios componentes pueden ser utilizados universalmente. Este astrolabio quintuple-universal es el más sofisticado que se ha construido e incluso los astrónomos de la Inglaterra del siglo XVI, donde el completo astrolabio universal saltó de nuevo a la fama, probablemente no habrían sabido utilizarlo.

7. Los europeos construyen su primer astrolabio

Un astrolabio europeo adquirido por Marcel Destombes en 1961 a través de un comerciante en Toulouse (significativamente justo al otro lado de la frontera española) fue descrito por él en un artículo revolucionario como «carolingio» y fechado en el siglo X en Cataluña. Una de las placas sirve para la latitud de 41'30°, asociada con «ROMA ET FRANCIA». La pieza es claramente el astrolabio europeo más antiguo que ha sobrevivido y procede de la zona en que ávidos europeos tomaron contacto por vez primera con la ciencia islámica. Sin embargo, sus características e inscripciones crearon multitud de problemas que por el momento no han podido resolverse, por lo que el instrumento fue generalmente considerado como una falsificación. Destombes se quedó tan frustrado por la reacción de los académicos en París que donó la pieza junto con el resto de su colección al Instituto del Mundo Árabe de París por no legarlo a una institución nacional. En 1993, en el XIX Congreso Internacional de Historia de la Ciencia que tuvo lugar en Zaragoza se dedicó una sesión especial al instrumento, que de ser auténtico tendría una importancia extraordinaria; sin embargo muchos de los interlocutores no salieron convencidos. A pesar de todo, la pieza está siendo analizada a la luz de docenas de primitivos astrolabios europeos y en último término, en la opinión de



quien esto escribe, es verdaderamente de la zona reivindicada por Destombes. El término 'Francia' ha de ser interpretado como un derivado del concepto «bilad al-ifranj», apropiado para Cataluña y su zona norte en el siglo X. Las «star-pointers» (las dos estrellas de la Osa Mayor que indican la polar), que están sin nombre, se hallan además incorrectamente situadas, especialmente comparadas con instrumentos y tablas de estrellas coetáneas o un poco más tardías. Las distintas inscripciones originales corresponden a aquéllas atestiguadas en otras inscripciones catalanas del siglo X y las inscripciones latinas más tardías (siglo XIII?) contienen curiosidades ortográficas (una R en RISES (*sic*) en lugar de P en PISCES) también halladas en otro astrolabio catalán de fines del siglo XIII conservado en la Sociedad de Anticuarios de Londres. Las inscripciones en latín macarrónico en la escala del calendario (por ejemplo, MAIAS por MAIUS) tienen sus paralelos en otras inscripciones latinas provinciales más tardías. El hecho de que el estilo del instrumento no mantenga relación con ningún otro astrolabio andalusí (tenemos uno del siglo X y varios del XI) o con cualquier astrolabio abasí (tenemos uno del siglo VIII o de principios del IX y varios del siglo X), así como la inclusión de Roma en las placas (señalada en varios astrolabios andalusíes) y una escala del calendario en el dorso (sin marcar en los astrolabios abasíes), me hace pensar en la existencia de una hipotética tradición romana en la construcción de astrolabios, hasta ahora desconocida. Destombes y su astrolabio han sido reivindicados, pero lamentablemente es un hecho que cuando se pone en duda la autenticidad de un artefacto, la pieza queda empañada para siempre.

8. Un astrolabio construido por un judío, grabado por un cristiano y acabado por un musulmán

Un astrolabio con tres bandas de inscripciones en cursiva en hebreo, latín y árabe apareció inesperadamente en una subasta en Francia en 1998. La pieza fue construida en la España cristiana, probablemente en Toledo a mediados del siglo XIV. Fue empezada por un judío, parcialmente completada por un cristiano que conocía bien el latín escrito de los copistas, y luego hay una clara ruptura en el grabado, realizado por un mudéjar que nos dejó su nombre, sencillamente Mas'ud. Quizás el judío y el cristiano murieron repentinamente por la peste europea (siglo XIV). Las inscripciones de Mas'ud, algunas en cartelas de plata incrustada, revelan huellas de árabe hispánico y también atestiguan cierto disimulo, como si Mas'ud fuese prisionero de los cristianos. Ciertamente quería sacarlo de allí, procurando su hégira hacia Dar al-Islam, y además quería llevar consigo su astrolabio, para lo cual lo equipó con un conjunto especial de marcas para las latitudes de Argel y la



Meca. No está claro por qué un hombre sensato habría querido ir a un lugar como Argel, ciudad especialmente exenta de actividad intelectual durante la Edad Media. (En el siglo XIII el viajero al-Abdari dijo que tratar de encontrar un hombre letrado en aquella ciudad era como buscar un caballo con huevos de camello). Pero Mas'ud aparentemente fue allí y parece que hemos identificado a su hijo: hay un tal Ibn Mas'ud de origen andalusí (alias Ibn F-r-m-j-h), nacido en Tlemcen en el momento adecuado y con interés por los instrumentos astronómicos. Hay un tratado suyo sobre el cuadrante astronómico conservado en la biblioteca de El Escorial. El astrolabio de Mas'ud resulta ser el único instrumento europeo que ha sobrevivido de la zona central de la España cristiana de poco antes del 1500 (en total se conocen cuatro astrolabios de la Cataluña medieval, siendo el primero el de Destombes). Ha sido posible reconstruir lo esencial de cómo esta pieza llegó a ser lo que es. Ningún otro instrumento medieval conjuga la vida y la suerte de tres individuos implicados en su construcción, aunque oscuras, conmovedoramente expresadas; es un fruto perfecto de la «convivencia» entre judíos, cristianos y musulmanes, aunque al-Andalus no fuese una utopía y la cooperación interreligiosa pueda no haber sido siempre voluntaria.

9. Dos astrolabios genuinos transformados por un falsificador y un competente artesano, respectivamente

En 1960 el Instituto de Historia de la Ciencia de la Universidad de Frankfurt adquirió dos astrolabios islámicos que aún posee. Por uno pagó un precio bastante exorbitante, no sólo porque era grande e imponente, sino también porque parecía estar asociado al celebrado polímata del siglo XIII Nasir al-Din al Tusi; el otro fue adquirido por bastante menos, no sólo porque era más pequeño. Desafortunadamente la inscripción que sugiere una dudosa conexión con Nasir al-Din revela ser una falsificación deliberada; la pieza era de hecho indo-iraní del siglo XVII, marcada y datada en el dorso por el bien conocido astrolabista Muhammad Khalil. De cualquier modo, el cuerpo del instrumento (mater) ha sido reelaborado y una inscripción original deliberadamente borrada; además algunas de las placas son varios siglos más antiguas que otras. Un análisis más cercano revela parte de una inscripción original con fecha de 1182/83 y un nombre poco significativo: Muhammad ibn Ahmad ibn 'Ali ibn Muhammad. Muhammad Khalil simplemente aportó un nuevo reticulado y un par de placas, incluyendo una de Isfahan. Así que por una modesta suma, el Instituto adquirió uno de los 30 astrolabios islámicos más antiguos, aunque sustancialmente modificado.



10. Un instrumentos que sobrevivió a la 2.^a Guerra Mundial

Un instrumento astrolábico de aspecto muy extraño que justo antes de la Segunda Guerra Mundial se hallaba en una colección privada en Munich era conocido hasta hace poco sólo por unas cuantas fotos. Después de la Guerra resultó imposible encontrar al dueño y el instrumento estaba presumiblemente perdido. Las fotos revelaban que la pieza había sido hecha por (Badi 'al-Zaman) Hibatallah ibn Husayn al-Baghdadi (al-Astulabi) en 1120/21, quien anunciaba en una inscripción que este era el esquivo *zij al-Safa=ih*, «manual astronómico sobre las placas (de un astrolabio)», ideado alrededor del siglo X por el escolar Abu Ja'far al-Khazin. Su mater está cubierta con tablas astronómicas, una filigrana considerable en el grabado, y tiene una placa astrolábica con marcas estándar para la latitud 331, que sirve para Bagdad, pero no tiene reticulado. Un estudio sobre la parte del instrumento visible en las fotos ha lamentado su pérdida y el hecho de que no tenemos una copia del tratado de al-Khazin basado en él, conocido por citas de notables estudiosos como Abu Nasr ibn 'Iraq y al-Biruni. En 1997 se tuvo acceso a una fotocopia incompleta de un manuscrito del tratado en una biblioteca de la India, y en el mismo año, durante una visita al Museo für Islamische Kunst de Berlín para echar un vistazo al astrolabio de Muhammad Zaman del siglo XVII, me informaron de que el instrumento perdido de Munich había sido localizado en los sótanos del museo. El tratado merece algo más que una disertación doctoral y el instrumento tiene más componentes de los que mostraban las viejas fotos. La investigación sobre ambos tendrá que esperar a lo que pongan de manifiesto los estudiantes de doctorado y a que se clarifique la propiedad del instrumento.

11. Un reloj de sol que lo dice todo sobre las horas de las plegarias

Muchos relojes de sol islámicos medievales tienen marcas para las horas de las plegarias del *zuhr* y del *asr*. Las definiciones para estos tiempos de oración que se convirtieron en estándar no están específicamente mencionadas ni en el «Corán» ni en el *hadith*; aparecieron por primera vez en los libros *fiqh* del siglo VIII. El origen de las curiosas definiciones para el *zuhr* en la práctica del Islam occidental y para el *asr*, ambos en función del incremento de la sombra sobre su mediodía mínimo, no había sido explicado hasta los años 70.

Actualmente un reloj solar de mármol hecho en Túnez alrededor de 1345 tiene marcas para estas dos oraciones y también para la oración «duha» de la mañana. Las marcas para el «duha» y el «asr» son simétricas respecto al meridia-



no, una característica que induce a investigar por qué están definidos de tal modo. La respuesta la encontramos en textos medievales sobre astronomía de fuentes populares, algunos de los cuales aportan una sencilla fórmula aritmética aproximada, de aparente origen indio, que empezó a ser conocida por los musulmanes en el siglo VIII, vinculando el tiempo del día medido en horas estacionales al incremento de la sombra. El propósito de las nuevas definiciones era unir el comienzo del *duha* con el momento en que habían pasado tres horas estacionales de luz diurna (media mañana), y el comienzo del *asr* con el momento en que habían pasado nueve horas (media tarde). Fue la inscripción *duha* en el reloj solar tunecino la que permitió comprobar que las definiciones derivaban de la asociación de las oraciones matutinas con las horas estacionales, junto a las consecuentes implicaciones históricas asociadas. Pero esto no tenía nada de novedoso: todo el asunto, incluyendo los tiempos de oración de otras religiones, lo trató al-Biruni (Ghazna, aprox.1025) en su libro «*Sobre las sombras*».

12. Un reloj solar que muestra el tiempo relativo a las horas de las cinco oraciones

Muchos relojes de sol islámicos medievales eran modestos en tamaño y potencial. Sin embargo, el astrónomo Ibn al-Shatir, jefe «muwaqqit» de la mezquita Umayyad en Damasco, construyó en 1371/72 un reloj solar horizontal de mármol, de unos 2 x 1 metros de tamaño. Fue erigido sobre una plataforma en el lado sur del minarete principal de la mezquita y era sin duda el reloj más espléndido de la Edad Media. Podía utilizarse para medir el tiempo matutino tras la salida del sol por la mañana y el tiempo vespertino antes del crepúsculo, así como el tiempo anterior y posterior al mediodía. Esto significa que medía el tiempo relativo a las oraciones del *zuhr* y el *maghrib* y también la curva del *asr* permitía regular el tiempo relativo a esa oración. Hay incluso curvas para medir el tiempo respecto al alba (primera luz) y al anochecer. Así que con este instrumento, que actualmente incluye tres relojes solares diferentes que comparten el mismo gnomon, uno puede medir el tiempo respecto al mediodía, la salida o la puesta del sol y respecto a los tiempos de oración. El original lo rompió en el siglo XIX el muwaqqit jefe de la mezquita, Muhammad ibn al-Tantawi, mientras intentaba arreglar su alineación. Las piezas, recuperadas durante las excavaciones de 1958, están en el jardín del museo arqueológico de Damasco; la réplica, de al-Tantawi, bellamente realizada, se encuentra todavía «in situ» en el balcón del minarete principal de la mezquita Umayyad.



13. Compases magnéticos y compendia

Dos nuevas fuentes nos permiten documentar la historia del compás en la civilización islámica de manera más precisa de lo que había sido posible hasta ahora. Estos inventos eran útiles en las determinaciones de la qibla o dirección sagrada en el Islam.

1) El sultán razulí yemení al-Ashraf (ver B13) en su recopilación de instrumentos astronómicos datado sobre el 1295 describió con detalle un compás-cuenco («tasa») con un borde graduado, en el que la aguja del compás flotaría en agua o algún otro fluido. Mi sospecha de que al-Ashraf estaba tomando de fuentes iraníes o de Asia Central la idea de este compás se reforzó por la existencia de un instrumento sirio de principios del XVI precisamente de este tipo, que sin duda pertenecen a una tradición de instrumentos iraníes mucho más antigua. Se trata de un cuenco de cerámica conservado en el Museo Arqueológico de Damasco que podía llenarse de agua y tenía una aguja magnética flotante para establecer las direcciones cardinales. Fue construido en Damasco por un tal Thabit, desconocido para nosotros, y está dedicado al sultán Selim I, por tanto data de 1516-1520. Este interesante objeto está totalmente inmerso en la tradición siria de los mosaicos de cerámica azules y blancos, que comenzó en el siglo XV. De todas maneras, sus datos geográficos son claramente iraníes en origen, pero se hallan tan mal conservados que se entienden muy poco. El cuenco de Damasco es precisamente la clase de instrumento descrito por el sultán yemení al-Ashraf. Hay, creo, suficientes evidencias para concluir que estos qibla-cuencos circulaban por Asia Central o por Irán en el siglo XIII, si no antes.

2) El astrónomo egipcio Ibn Sim'un, que escribió sobre el 1300, describe un compás «seco», en ocasiones equipado con un pequeño reloj de sol horizontal. Su descripción va seguida de una lista de qiblas de numerosos localidades.

Ibn al-Shatir (ver B12) ideó un compendium, es decir, un instrumento multifuncional en forma de caja con una tapa con bisagra y varias partes móviles. Algunas partes de este «joyero» (Asandūq al-yawaqit) hecho por el mismo Ibn al-Shatir sobrevive en Alepo, y una única placa de otro hecho por el astrónomo de El Cairo al-Wafa'i (ver B6) se conserva en Estambul. Un tratado conservado en Berlín explica el modo en que se podía utilizar el conjunto. La caja contenía un compás magnético para alinearlos en las direcciones cardinales y un reloj de sol polar universal en una placa que podía engancharse a la tapa y ser alzada en un plano perpendicular al ecuador celeste para cualesquiera series de latitudes. También, los puntos de mira podían unirse a la tapa para medir el ángulo horario de cualquiera de esas latitudes, y un conjunto de horizontes grabados en la tapa permitían al usuario computar la configuración instantánea de la eclíptica relativa al horizonte apropiado. Además, la placa contenía marcas que indicaban las qiblas o direcciones locales hacia la Meca para una serie de localidades.



Otra clase de compendium descrito por al-Wafa'i consiste en una base circular provista de un compás magnético y un reloj solar ecuatorial universal. Su instrumento fue popular en la Turquía otomana durante varios siglos y algunos ejemplares han sobrevivido. El hecho de que el compás magnético no necesariamente apuntara en dirección Norte-Sur fue observado por primera vez en el mundo islámico por al-Wafa'i.

14. Mapamundis para determinar la Qibla y la distancia a la Meca

En 1989 un interesante artefacto apareció en Sotheby's, Londres: un instrumento circular de bronce con un diámetro de 22'5 cms. que, en base a la elegante decoración y a las inscripciones persas, puede fecharse sobre el 1675. En la placa circular está grabado un mapamundi con las posiciones de una 150 localidades desde al-Andalus hasta China, grabados en un complejo reticulado matemático que conserva la dirección y la distancia a la Meca, situada en el centro. Los meridianos están representados por una serie de paralelos verticales que se van aproximando entre sí mientras más se aleja uno del meridiano central de la Meca, y los paralelos de latitudes están representados por arcos de círculos que derivan en arcos de elipses. Las inscripciones indican que si uno pone la regla diametral sobre una ciudad dada entonces la qibla puede leerse en la escala exterior y la distancia a la Meca en la escala diametral no uniforme. Los mapas con la cualidad de preservar la dirección y distancia a un centro no polar, en este caso la Meca, fueron inicialmente ideados en Europa en las primeras décadas del siglo XX, así que el contexto del mapa no era un problema fácil desde que estuvo claro que era una auténtica pieza safawí.

Antes de que la pieza pudiera ser valorada adecuadamente, un comerciante de instrumentos de París exhibió un segundo ejemplar. Estaba firmado por un tal Muhammad Husayn, conocido a través de fuentes textuales como uno de los artesanos principales de Isfahan a fines del siglo XVII. Desafortunadamente ninguna de las piezas con su firma se ha conservado (e incluso esta pieza parece como si hubiera sido hecha hacia el 1800). Se puso de manifiesto inmediatamente que los dos mapamundis eran ejemplares de una serie, de hecho, esmeradas copias de un mapamundi más detallado.

Parecía razonable sospechar que debían tener alguna influencia europea en su reticulado (los instrumentos en los que se grababan los mapas estaban originalmente equipados con relojes de sol de tipo europeo y compases magnéticos). Pero mi investigación de la cartografía europea contemporánea y de las actividades de los europeos residentes o visitantes de Irán en el siglo XVII no aportó pruebas de tal iniciativa europea. También las obras safawíes del siglo XVII sobre la qibla e



incluso sobre astronomía en general están en desacuerdo. Ahora los datos geográficos (longitudes y latitudes) provienen de una fuente timúrida, una tabla geográfica con 274 entradas aparentemente recopiladas en Kish, cerca de Samarcanda, a mediados del siglo XV. El anónimo compilador calculó la qibla y las distancias a la Meca de todas las localidades con bastante exactitud dentro de un margen de error de pocos segundos; así que la cuestión que se plantea es si fue capaz también de dar una solución gráfica al problema que tan hábilmente resolvió mediante el cálculo. Pero sólo conservamos la tabla en una recensión del siglo XVIII en donde las qiblas y distancias se redondean a minutos.

Hubo dos estudiosos musulmanes más antiguos, los únicos en la historia de la ciencia islámica que no sólo se interesaron por el problema de la qibla, sino también por el de los mapas que conservan la dirección y la distancia al centro. El primero fue Habash (sobre el 825) y el segundo al-Biruni (sobre el 1025). Habash parece haber sido el primero que solucionó el problema de la determinación de la qibla a través de dos métodos exactos y distintos, uno de los cuales incluye la fórmula matemática que relaciona la qibla y la distancia a la Meca que subyace en los reticulados safawíes. Habash también diseñó un astrolabio basado en un principio relacionado con lo anterior que conservaba la dirección y la distancia hacia el centro, en este caso, el polo celeste. No hay evidencia concreta de que Habash concibiera un reticulado centrado en La Meca conservando la dirección y la distancia hacia el centro en base a una fórmula que él mismo hubiera deducido. De todos modos, un anónimo tratado abasí, posiblemente un trabajo temprano de Habash, deduce la qibla a partir de tres o cuatro métodos cartográficos que podían aplicarse a los mapas o derivarse de los mismos. Asimismo, al-Biruni, que se hallaba familiarizado con algunos de los trabajos de Habash, escribió sobre la cartografía subyacente en el astrolabio de Habash y sobre otros astrolabios considerados generalmente como de producción europea. Sólo se han conservado dos entre la docena de títulos de al-Biruni relacionados con la geografía matemática y las determinaciones de la qibla, y en ellos no se menciona ningún reticulado centrado en La Meca. En cualquier caso, a faltade una hipótesis alternativa viable, creo que es posible que algún trabajo de Habash o al-Biruni (estamos hablando sobre unas pocas frases de texto) que hubiera permanecido oculto durante varios siglos podría haber llegado a manos de algún astrónomo timúrida (o incluso safawí). De todas maneras, estos dos mapamundis safawíes, que constituyen los únicos mapamundis islámicos propiamente dichos que han sobrevivido a las vicisitudes del tiempo, han impulsado una investigación detallada sobre las evidencias disponibles. Los mapamundis continúan siendo un misterio y espero que investigaciones más avanzadas sobre manuscritos científicos árabes y persas, por una parte, y por otra, sobre materiales relacionados con la transmisión de geografía y cartografía matemática entre Europa e Irán en ambas direcciones, puedan arrojar más luz sobre este fascinante problema.



15. Uno de los instrumentos más refinados de la Europa Medieval

No se conoce ningún artilugio del mundo islámico con el que se pueda hallar sin cálculo la hora del día para cualquier latitud a partir de la altura solar. Sin embargo, el ingenioso reloj universal europeo para medir el tiempo por el sol, conocido como *navícula de Venetiis* (navícula veneciana), del que han sobrevivido unos pocos ejemplares, sobre todo de la Inglaterra del siglo XIV, hizo pensar durante mucho tiempo que se basaba en un invento islámico. Recientemente he defendido la limitada evidencia de que los principales componentes matemáticos de la navícula, no necesariamente organizados en forma de barco, hayan tenido su origen en la mente de Habash.

En un manuscrito único de Oxford hay un tratado de Habash sobre un instrumento para hallar la hora nocturna mediante las estrellas. En forma de astrolabio con trono, el instrumento contiene datos matemáticos relativos a las coordenadas estelares, insertados gráficamente. Con la ayuda de reticulados trigonométricos y de varias escalas no uniformes en la alidada, estos datos pueden manipularse para obtener respecto a cualquier latitud la hora nocturna y el azimut de la estrella mediante su altura, sin necesidad de cálculo. Lamentablemente las operaciones no se describen en el tratado, que sólo se ocupa de la construcción y se halla incompleto, habiendo desafiado hasta ahora una explicación satisfactoria. Además, el enciclopedista del siglo IX Abu 'Abdallah al-Khwarizmi menciona un *lawh al-sa'at* como uno de los artefactos conocidos por él para medir el tiempo, y un manuscrito otomano contiene una ilustración de un aparato rectangular catalogado simplemente como «mustatil», que parece ser unos siglos más antiguo que la ilustración y no necesariamente de inspiración europea. Está claro que el inventor de las marcas principales de la *navícula* sabía muy bien cómo usar el instrumento para obtener un resultado exacto. Mi razón fundamental para sospechar que Habash se encuentre detrás del inteligente aparato matemático subyacente en la *navícula* cuando se la utiliza apropiadamente es la idea de que sólo se puede inventar un instrumento universal para las estrellas si previamente se ha inventado uno para el Sol. Pero en la *navícula* medieval estándar había dos conjuntos adicionales de marcas: un tablero indicador de sombras y un cuadrante horario universal para determinar aproximadamente la hora diurna para cualquier latitud; sabemos con certeza que estos elementos se inventaron en el siglo IX en Bagdad.

NOTAS FINALES

Nos hemos ocupado de algunos instrumentos bastante excepcionales; el lector deberá tener presente que muchos astrolabios y cuadrantes islámicos son



piezas muy corrientes. Todavía queda mucho trabajo que realizar con instrumentos y grupos de instrumentos de especial importancia histórica y respecto a ciertas facetas, en particular los análisis metalúrgicos y las técnicas de construcción, los futuros investigadores tendrán que empezar prácticamente de cero. Igualmente, se puede escribir mucho aún acerca de la decoración y los cambios de diseño en los reticulados de los astrolabios. Además, queda mucho por hacer en el campo de las fuentes textuales relativas a la instrumentación. Textos e instrumentos deben considerarse a la luz de la actividad astronómica coetánea. La inminente publicación del *Répertoire* de Francis R. Maddison y el finado Alain Brioux de todos los astrolabistas islámicos conocidos y sus obras se supone que suscitará un renovado interés sobre esas valiosas fuentes históricas.

Traducido del inglés por *María Jesús Rodríguez*
Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia