



LA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRÓN ALBA

RAMÓN PASCUAL

Presidente de la Fundación Parc Taulí

SE DESCRIBEN LAS BASES DE LAS FUENTES DE LUZ DE SINCROTRÓN Y SU EVOLUCIÓN, desde las llamadas de primera generación hasta las actuales, basadas sobre todo en dispositivos de inserción. Se expone su importancia en multitud de campos de la ciencia y la tecnología, tanto en la investigación básica como en la aplicada; asimismo, se indica la importancia de la construcción de este tipo de instalaciones para el desarrollo tecnológico de las empresas que colaboran en su construcción. A continuación se describe la fuente de luz de sincrotrón ALBA, ahora en construcción en los alrededores de Barcelona, la única que existirá en el suroeste de Europa. Se expone el efecto científico, tecnológico y económico que esta gran instalación tiene y el que tendrá cuando entre en funcionamiento, con sus siete líneas experimentales, a comienzos del año 2010.

RAMÓN PASCUAL (BARCELONA, 1942) SE LICENCIÓ EN LA UNIVERSITAT DE BARCELONA (1963) y se doctoró en la de Valencia (1966). Fue becario posdoctoral en el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste (actual Centro Abdus Salam) y ha sido investigador en otros centros extranjeros como el CERN, la Facultad de Orsay de la Universidad de París y el Rutherford Laboratory de Oxford. Ha sido profesor de las Universidades de Valencia, Complutense de Madrid, Zaragoza, Autónoma de Madrid y Autónoma de Barcelona, en la que ha sido Decano de la Facultad de Ciencias, Vicerrector y Rector (1986-1990). Fue Director General d'Ensenyament Universitari de la Generalitat (1980-1983) y Director del Grupo Interuniversitario de Física Teórica (GIFT, 1980-1984). Su especialidad cubre la mecánica cuántica y la física de las partículas elementales. Ha publicado artículos en las revistas internacionales más acreditadas y también es colaborador habitual de algunos medios de comunicación escritos, en especial en temas de ciencia y de políticas científicas y universitarias. Es vicepresidente de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona y está en posesión de la medalla Narcís Monturiol. En la actualidad es presidente de la Fundación Parc Taulí y presidente de la Comisión Ejecutiva del Consorcio de la fuente española de luz de sincrotrón ALBA, proyecto del cual ha sido impulsor.

LA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRÓN ALBA

RAMÓN PASCUAL

Presidente de la Fundación Parc Taulí

INTRODUCCIÓN

EN ESTE ARTÍCULO DESCRIBIREMOS LA FUENTE DE LUZ DE sincrotrón ALBA que está en construcción en Cerdanyola del Vallès, municipio cercano a Barcelona en el que también se encuentra el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Antes indicaremos qué es una fuente de luz de sincrotrón y para qué sirve.

Es bien sabido que para ver un objeto debemos iluminarlo, recoger en nuestra retina la luz reflejada y disponer de un cerebro que interprete la señal y reconozca la forma del objeto. A lo largo de la historia el hombre ha mejorado la visión con la utilización de instrumentos como los microscopios y los telescopios, que ayudan al ojo humano. Pero las observaciones de detalles con la luz visible, la que es capaz de ser captada por nuestra retina, tienen un límite: la óptica nos enseña que, en principio, con luz de una cierta longitud de onda no se puede obtener un poder de resolución mejor que la misma longitud de onda, que en el caso del visible está entre 300 y 700 millonésimas de milímetro.

Por tal razón la ciencia actual utiliza como elemento de análisis de estructuras pequeñas ondas electromagnéticas de longitudes de onda más pequeñas como, por ejemplo, los rayos ultravioletas y, sobre todo, los rayos X. Esto nos obliga a encontrar fuentes luminosas de estas radiaciones y, como no podremos captarlas reflejadas con la retina, a construir “retinas” artificiales (denominadas detectores) y reconstruir las imágenes mediante cálculos con computadoras. Los primeros que usaron estas técnicas para estudiar las estructuras de los sólidos mediante la dispersión de rayos X fueron William H. Bragg y William L. Bragg. Hoy, las mejores fuentes de ra-

yos X utilizan la radiación que emiten las partículas cargadas, en particular los electrones, cuando recorren la trayectoria de los aceleradores circulares de partículas conocidos como sincrotrones.

LAS FUENTES DE LUZ DE SINCROTRÓN Y SU UTILIDAD

Los sincrotrones son aceleradores de partículas en los que éstas, empaquetadas en un estrecho haz, recorren siempre una misma trayectoria, más o menos circular, gracias a conjuntos de imanes de diversos tipos que obligan al haz a curvarse y focalizarse. A medida que aumenta la energía de las partículas se regulan las intensidades de los campos magnéticos, de forma que el radio de curvatura de la trayectoria no varíe. Los primeros sincrotrones dedicados a la física de partículas elementales han aumentado de energía y tamaño, hasta llegar al complejo de aceleradores del CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, en Ginebra, con el Large Electron Positron, LEP, y el Large Hadron Collider, LHC, mismos que se espera inaugurar antes de un año.

En los sincrotrones las partículas tienen una aceleración centrípeta y, según las leyes de Maxwell del electromagnetismo, emiten ondas electromagnéticas. Cuando las partículas se mueven a velocidades próximas a la de la luz, como sucede en los sincrotrones, estas ondas, o luz de sincrotrón, tienen propiedades únicas que las hacen deseables para una amplia comunidad de científicos. La luz de sincrotrón fue observada por primera vez en 1947. Tras la primera demostración experimental de su utilidad, en el acelerador del National Bureau of Standards de Estados Unidos de América en 1963, se empezaron a realizar los primeros experimentos denominados de primera generación, usando la luz de sincrotrón emitida por los imanes de curvatura de los aceleradores de física de partículas de manera parasitaria. Más adelante, se comenzó a construir sincrotrones dedicados en exclusiva a la producción de luz de sincrotrón, las fuentes que se denominan de segunda generación. La primera se construyó en Estados Unidos de América, en 1977, el Tantalus de la Universidad de Wisconsin. La primera de estas fuentes europeas se puso en marcha en 1978 en Daresbury, en el Reino Unido. En la actualidad, el número de fuentes de luz de sincrotrón de varios tipos en todo el mundo es casi de un centenar.

La luz de sincrotrón posee propiedades únicas para un espectro muy amplio de investigadores: la luz se emite hacia adelante, en la dirección tangencial, formando un haz en extremo colimado, en un cono que tiene un ángulo de apertura del orden de los microradianes. Es muchísimo más intensa que la de las fuentes convencionales y, contrario a éstas, tiene un espectro continuo, desde los rayos infrarrojos hasta los rayos X. Está polarizada en el plano de la órbita y, además, se emite en pulsos muy cortos (del orden de la millonésima de millonésima de segundo) y con una estructura periódica (del orden del microsegundo).

Como indicamos, la luz de sincrotrón es de utilidad en un ancho abanico de campos científicos y, al igual que muchas grandes instalaciones de este tipo, sus fuentes generan un significativo impacto socio-económico. Una evidencia del interés de la luz de sincrotrón es el rápido crecimiento del número de nuevas fuentes que, en nivel mundial, están en funcionamiento, en construcción o en proyecto. Muchos países han respondido a esta necesidad construyendo fuentes de luz de sincrotrón. Así ha sucedido en Europa, Alemania, Francia, Italia, el Reino Unido, Suiza, Suecia, en diversos sitios de Estados Unidos de América y de Japón, y en países como Australia, Canadá, Corea del Sur, India, Jordania, Rusia, Singapur, Tailandia, Taiwán, Ucrania o China. Hasta ahora la única fuente en Latinoamérica es la de Campinas, en Brasil, cuya energía es relativamente baja. Además de estas fuentes pertenecientes a distintos estados, suele haber fuentes de características especiales en las grandes regiones del mundo, como la European Synchrotron Radiation Facility, ESRF, en Grenoble; SPRING-8, en Nishi-Harima, Japón, y la Advanced Photon Source, en Argonne, Estados Unidos de América.

En nuestros días la luz de sincrotrón es una herramienta que se usa cada vez más en muchos campos de la investigación tanto básica como aplicada y tecnológica. Entre los usuarios industriales de la luz de sincrotrón destacan las industrias farmacéuticas, las industrias alimentarias y de cosméticos, los sectores textiles y de plásticos, las empresas interesadas en catalizadores y en problemas de contaminación, las empresas metalúrgicas y las de materiales constructivos, entre otras. Además, cabe mencionar su uso en las técnicas litográficas empleadas en microelectrónica y, en fecha más reciente, en micromecánica, con la construcción de implantes médicos o de dispositivos usados en microcirugía. La lista sería inacabable y el número de aplicaciones, creciente.

En la investigación fundamental y aplicada la luz de sincrotrón se usa en campos tan diversos como la física, la química, la ciencia de materiales y de superficies, la biología estructural, la geofísica, las ciencias ambientales, la arqueología y la paleontología, etc. También empieza a emplearse en varias ramas de la medicina, como en imagen médica y en radioterapia.

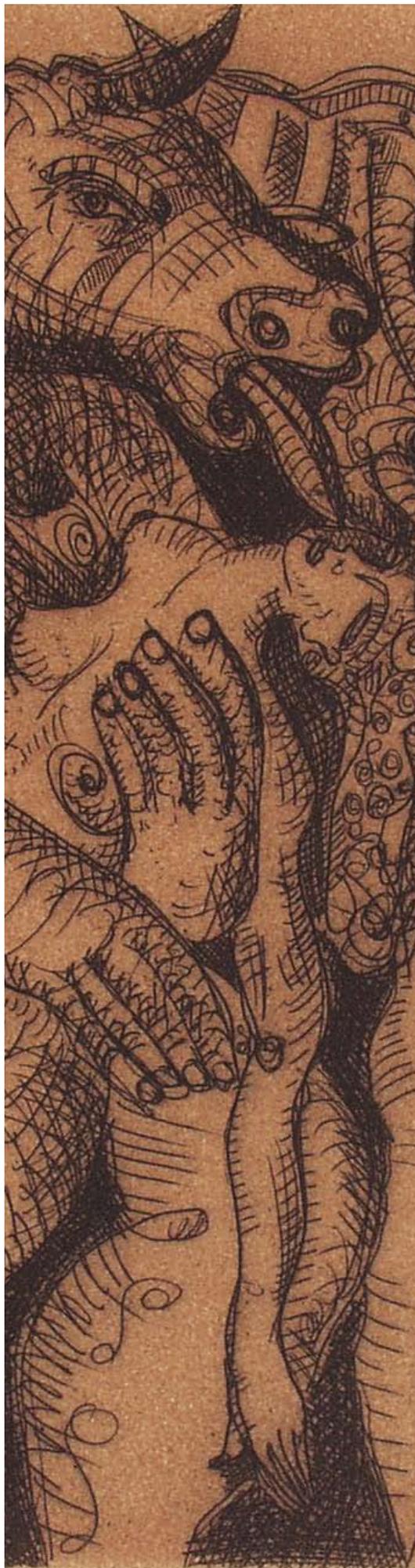
Desde un punto de vista empresarial, la luz de sincrotrón no sólo es útil por sus aplicaciones sino que, tal como sucede con las grandes instalaciones científicas, la construcción de una fuente estimula el desarrollo tecnológico de las empresas que forman parte en su construcción y en las que participan en su mantenimiento y en la mejora de su instrumental. En general, a estas empresas se les piden nuevos productos que desarrollan en conjunto con los equipos técnicos del proyecto, con lo cual obtienen un *know how* que después podrán utilizar en sus actividades comerciales. Estas industrias van desde las de ingeniería civil, que deben someterse a rigurosos requerimientos técnicos, hasta empresas especializadas en imanes, ingeniería de precisión, fuentes de alimentación, ultraaltovacío, radiofrecuencia, criogenia, informática, electrónica y control.

En las fuentes actuales de luz de sincrotrón, los electrones que salen de un pequeño acelerador lineal a energías del orden de unos 200 megaelectronvolt (MeV) se inyectan en un sincrotrón impulsor (*booster*) que los acelera hasta una energía de unos pocos giga-electronvolt (GeV). A la salida del *booster*, un imán desviador los inyecta en un anillo de almacenamiento en el que se mantienen circulando por, al menos, decenas de horas, emitiendo luz de sincrotrón y recuperando la energía perdida mediante cavidades de radiofrecuencia. Los anillos de almacenamiento tienen forma poligonal, con los imanes dipolares en los vértices del polígono, y con tramos rectos en los que los electrones viajan con libertad. Cuando los electrones pasan por los imanes de curvatura emiten la luz de sincrotrón normal. En las fuentes modernas, las denominadas de tercera generación, se aumenta la longitud de los tramos rectos que hay entre los imanes de curvatura hasta unos cuantos metros para situar los denominados dispositivos de inserción, tales como *wigglers* y onduladores, instrumentos que suelen producir luz de más calidad que la de los imanes de curvatura.

La luz de sincrotrón sale de manera tangencial del imán de curvatura o del dispositivo de inserción en lo que se denomina una "línea de luz" y pasa hacia un sistema óptico que selecciona la longitud de onda que se desee para un determinado experimento y la focaliza hacia la muestra por examinar. Una vez que la luz deseada ha incidido sobre la muestra, un detector capta la señal producida en el proceso y envía los datos hacia un sistema de adquisición que los procesa y almacena.

LA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRÓN ALBA

En Europa todas las fuentes de luz de sincrotrón (a excepción del ESRF) están por encima de la línea que va de París a Trieste. Esto significaba que hacía falta una fuente que cubriera el suroeste europeo, misma que en el futuro pudiera ser interesante para los países del Magreb y también quizá para los de Latinoamérica que precisaran de mayores prestaciones que las de la fuente brasileña. Por tanto, era bastante lógico que España se planteara la necesidad de contar con una fuente de luz de sincrotrón de tercera generación. Por tal razón el gobierno de la Generalitat de Catalunya, en su primer Plan de Investigación (1993-1996), oficializó su intención de



construir una fuente de luz de sincrotrón. La decisión se basó en un estudio de viabilidad encargado en julio de 1992 a un grupo de trabajo, y también en los resultados de rondas de consultas a grupos de expertos.

El paso siguiente fue la creación de una Comisión Promotora, que se constituyó el 31 de marzo de 1993 y de una Comisión Asesora internacional formada por directores de grandes laboratorios extranjeros. También se convocaron 10 becas dirigida a jóvenes licenciados y doctores recientes para empezar a formar personal en el campo de los aceleradores en general, y de las fuentes de luz de sincrotrón en particular. Con la incorporación de un director experimentado se inició el diseño de una fuente de luz de sincrotrón y se construyeron algunos prototipos de sus elementos más importantes, se localizó una posible ubicación en el campus de la UAB y se empezó el estudio geotécnico del terreno. Dos años más tarde se firmó un convenio con el gobierno español para financiar en conjunto los trabajos.

Una vez acabado el estudio detallado del proyecto se hizo evaluar por expertos extranjeros y se creó una comisión de estudio que evaluara las necesidades de los usuarios españoles. A continuación, en 2001, la Comisión Asesora de Grandes Instalaciones Científicas formuló una recomendación prioritaria y unánime de hacer una fuente como la propuesta y no dilatar más la decisión de construirla. Por último, el 14 de marzo de 2002, en el marco de la reunión del Consejo Europeo de Barcelona y bajo la presidencia del Presidente del Gobierno español, el Presidente de la Generalitat y la Ministra de Ciencia y Tecnología firmaron un protocolo de intenciones en el que se establecía el compromiso para la construcción, el equipamiento y la explotación de una fuente de luz de sincrotrón en Cerdanyola del Vallès. De igual forma, se estipulaba que las dos administraciones debían firmar un convenio específico que regulara los detalles del proyecto, que debería ser financiado por mitades entre las dos administraciones promotoras.

Tras la constitución del Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz de Sincrotrón, CELLS, el 14 de marzo de 2003, y la primera reunión de su Consejo Rector unos meses más tarde, se procedió a la designación del director y se empezó a reclutar el personal. Se incorporó a algunas de las personas que se habían formado en un inicio y se contrató a los responsables de las cinco divisiones del consorcio: aceleradores, científica, ingeniería, datos y control y administración. En la actualidad el consorcio cuenta con unas 120 personas y una perspectiva de llegar a 138 a finales de 2007. Cerca de un tercio del personal es extranjero y dos tercios son españoles, la mitad de los cuales trabajaban con anterioridad en el extranjero. Su ubicación provisional es en la Facultad de Ciencias de la UAB y en unos módulos prefabricados próximos a la misma facultad. Las necesidades de laboratorio son, también en forma temporal, cubiertas por una buena parte del edificio del taller de dicha universidad.

La ubicación del sincrotrón, que ya se había bautizado con el nombre ALBA, en Cerdanyola y cerca de la UAB tiene muchas ventajas estratégicas. Por un lado, la proximidad del núcleo investigador que representa la UAB y el núcleo de las demás universidades y centros de investigación del entorno de Barcelona. Por otro lado, la cercanía de la ciudad de Barcelona, situada a unos 20 kilómetros, la proximidad del aeropuerto, y el hecho de estar junto a la autopista A-6 (de Madrid a Francia por la Junquera) y cerca del cruce de esta autopista con la C-58 (de Barcelona a Francia por Puigcerdà). Si bien en un principio se pensó en ubicar la instalación dentro del propio campus universitario, en parte a causa de las características del subsuelo, se decidió construir ALBA en unos terrenos más estables y amplios situados al otro lado de la autopista, en una parcela de 6.5 hectáreas situada en una

zona de 340 hectáreas, buena parte de las cuales están calificadas como terrenos científico-técnicos. El proyecto ejecutivo del edificio fue encargado a una compañía de ingeniería, la construcción se inició en mayo de 2006 y se prevé que acabe en agosto de 2008.

El edificio que debe albergar ALBA tiene tres requisitos que lo hacen notablemente complejo. Por un lado el terreno ha de ser capaz de ubicar un edificio muy estable frente a las vibraciones y los movimientos del terreno; por tanto, se le ubicó lo suficientemente lejos de fuentes de vibraciones locales y se construyó con una importante cimentación de la zona crítica. Por otro lado, su sistema de ventilación debe ofrecer una gran estabilidad térmica con un margen general de variaciones de temperatura no superior a un grado, lo que ha exigido un estudio detallado de los sistemas de ventilación y calefacción. Por último, se debe contar con una estabilidad en el suministro eléctrico que no es habitual. Se espera conseguir dicha estabilidad eléctrica con un sistema de doble suministro y unos sistemas de continuidad estáticos y dinámicos. El doble suministro se hará desde una subestación transformadora alimentada por una línea de 220 KV que se construye cerca de la instalación, con un transformador exclusivo para ALBA, y desde una central de poligeneración que dará a la vez suministro eléctrico y solucionará las demandas de frío y calor.

También se procedió a rediseñar las características de la fuente de luz de sincrotrón, incorporando los adelantos producidos en los últimos años como, por ejemplo, el sistema de inyección continuada, la ubicación del *booster* y el anillo en un mismo túnel, etc. Todas estas decisiones fueron avalladas por una Comisión Asesora del Acelerador, nombrada por el Consejo Rector. ALBA será un acelerador de electrones con imanes convencionales que formarán un anillo de 268.8 metros de circunferencia. Los electrones se llevarán hasta una energía de 200 MeV mediante un acelerador lineal, para pasar después a un *booster* que, por medio de un sistema de radiofrecuencia, los acelerará hasta una energía final de 3 GeV, es decir, una velocidad prácticamente igual a la velocidad de la luz. Una vez que los paquetes de electrones tengan esta energía se inyectarán en el anillo principal en el que los electrones circularán emitiendo la luz de sincrotrón.

El anillo de ALBA tendrá características parecidas a las de las mejores fuentes de luz de sincrotrón. Contará con cuatro secciones rectas de ocho metros de longitud, de las cuales tres podrán acoger dispositivos de inserción; 12 de 4.4 metros con capacidad para 10, y ocho de 2.6 metros para cinco dispositivos. Por el anillo podrá circular una corriente de hasta 400 mA. Uno de los datos que caracteriza las prestaciones de una fuente de luz de sincrotrón es lo que se llama la emitancia horizontal, que en el caso de ALBA será menor que 4.3 nm•rad. El anillo podrá albergar más de 30 líneas de luz independientes. Aunque en el inicio el proyecto contemplaba construir cinco, las propuestas de la comunidad española de usuarios convencieron al Consejo Rector de ampliar este número inicial hasta siete, que son las que se están construyendo en la primera fase.

Estas líneas son las siguientes:

- Una dedicada a espectroscopía y microscopía de electrones fotoemitidos, de amplia utilización en ciencia de materiales.
- Una dedicada a difracción circular magnético y dispersión resonante con rayos X blandos, también para atender, sobre todo, a necesidades de ciencia de materiales.
- Una de difracción de rayos X duros en material en polvo con opción de microfoco, también para ciencia de materiales.
- Una de espectroscopía de absorción de rayos X, para usuarios de química, materiales y biología.
- Una de difracción/dispersión de rayos X en material no cristalino, para biología y ciencia de materiales.
- Una para cristalografía de macromoléculas, de uso en biología.
- Una de microscopía de rayos X, de interés en biología.

Además de la justificación científica de ALBA, se consideró conveniente hacer un análisis coste-beneficio del proyecto y estudiar su impacto socioeconómico. El resultado fue que, en un escenario básico con una tasa de descuento de 4% y una inflación de 2.5%, el Valor Actualizado Neto (VAN) resultó ser de 140.9 M y la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR), de 9.4%. Con respecto al efecto del proyecto, durante la fase de construcción (que en un principio era de 2003 a 2008), el impacto sobre la producción se estimó en 266 M€ (de 2003), el aumento del valor añadido, en 140 M€, y la media anual de puestos de trabajo, en 463. Durante la fase de funcionamiento (desde 2009 hasta 2033, en lo que se estima la vida de la instalación en caso de que no se hagan reinversiones), el impacto sobre la producción se estimó en 735 M€, el aumento del valor añadido, en 417 M€, y la media anual de puestos de trabajo, en 463. En opinión de los economistas, estas cifras son muy satisfactorias.

Se espera que entre finales del año 2009 y comienzos del 2010 la fuente de luz de sincrotrón haya superado su periodo de comprobaciones y que las siete líneas empiecen a funcionar de manera progresiva y acojan a más de un millar de usuarios al año. Si bien con seguridad la mayoría de éstos serán catalanes y españoles, se espera que la buena calidad de las líneas de luz las hagan atractivas para usuarios de otros países de Europa (en especial los del sur de Francia y Portugal) y también, como ya indicamos, para los de los países del Magreb y los de América del Sur (para éstos de manera complementaria al Laboratório Nacional de Luz Síncrotron de Campinas.