

Nodos de la Física

Descripción de la estructura, objetivos y actividades de los centros de acción científica, públicos y privados, más significativos en España que, con una notable participación de físicos, realizan investigación científica o técnica y docencia avanzada

La fuente de luz de sincrotrón ALBA

Por Gastón García, Ana Belén Martínez, Salvador Ferrer e Inmaculada Ramos, Sincrotrón ALBA, Cerdanyola del Vallès

Este artículo describe la fuente de luz de sincrotrón ALBA, que entró en operación regular con usuarios en 2012. Cuatro años más tarde ALBA se ha consolidado como un elemento de referencia en el paisaje de la I+D+i española, con siete líneas de luz plenamente operativas, dos más en construcción y excelentes perspectivas para iniciar la construcción de varias adicionales próximamente, la primera de ellas ya aprobada para 2016. ALBA es una apuesta decidida de posicionamiento a un nivel competitivo en el marco internacional. En las páginas siguientes se hace un recorrido por los aspectos más relevantes de esta gran infraestructura científica, con particular atención a su situación actual.

Introducción

ALBA es una fuente de luz de sincrotrón de tercera generación situada en Cerdanyola del Vallès, a unos 20 kilómetros del centro de Barcelona. Su diseño, construcción y posterior entrada en operación han supuesto un reto sin precedentes en España, culminado con éxito. Este artículo tiene como finalidad ofrecer a los lectores una visión de conjunto sobre ALBA, la historia del proyecto y su situación actual. Queda fuera de su alcance la presentación de resultados científicos concretos obtenidos en ALBA.

Descripción de ALBA

¿Qué es una fuente de luz de sincrotrón?

Una fuente de luz de sincrotrón es un complejo de aceleradores diseñado para producir y utilizar como herramienta analítica la luz emitida por las partículas cargadas aceleradas [1].

Efectivamente, las ecuaciones de Maxwell predicen que cuando una partícula cargada (generalmente electrones en las fuentes de luz de sincrotrón) sufre una aceleración por efecto de su interacción con un campo electromagnético se produce un fenómeno de radiación con unas características de intensidad y espectrales bien definidas. Esta emisión cubre un intervalo de frecuencias amplio, cuya distribución espectral y angular depende críticamente de la energía de la partícula acelerada. Una forma sencilla de visualizar cualitativamente esta dependencia y sus características básicas consiste en calcular en primer lugar la emisión en el sistema de referencia donde la partícula está en reposo y posteriormente aplicar una transformación de Lorentz que nos lleve al sistema de referencia del laboratorio. El efecto de esta transformación es producir un corrimiento hacia altas frecuencias de todo el espectro y una concentración de la emisión dentro

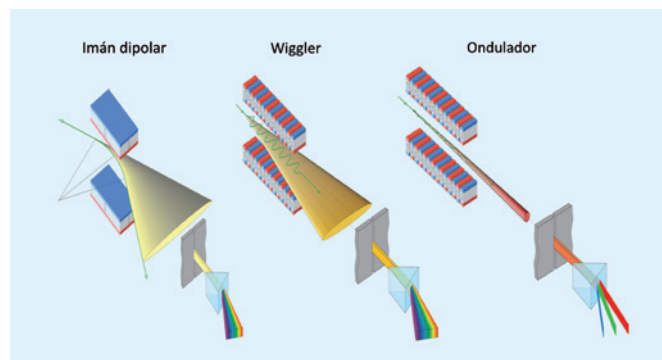


Fig. 1. Esquema de la producción de luz con un imán dipolar y con un dispositivo de inserción (cortesía de J. Marcos).

de un estrecho cono en torno al eje definido por el momento lineal de la partícula emisora. Ambos efectos se hacen más intensos cuanto mayor sea la energía cinética de la partícula en el sistema del laboratorio.

Los electrones son producidos en paquetes, acelerados hasta una energía de trabajo adecuada y posteriormente almacenados en un nuevo acelerador llamado anillo de almacenamiento. En él, vuelta tras vuelta, se produce la emisión de luz con la subsiguiente pérdida de energía. Esta energía perdida es suministrada de nuevo a los electrones mediante campos electromagnéticos de radiofrecuencia que se localizan en cavidades resonantes. Todos estos elementos funcionan con un sistema de sincronización muy preciso, de modo que el momento en que el paquete atraviesa la cavidad coincide con aquél en que la onda de radiofrecuencia tiene la fase adecuada. De este modo los electrones reciben la inyección de energía necesaria en cada vuelta. La emisión de luz es particularmente importante en los imanes dipolares, que son los que curvan la trayectoria del haz para dar lugar a una órbita cerrada. Las llamadas fuentes de primera generación fueron diseñadas para hacer experimentos que no utilizaban la emisión de luz de sincrotrón y aprovechaban ésta, producida en los imanes dipolares, de modo genuinamente parásito. Las fuentes de segunda generación funcionan en base al mismo principio, pero ya fueron diseñadas y optimizadas para producir luz de sincrotrón: todavía los imanes dipolares juegan el doble papel de proporcionar una órbita cerrada y generar luz. Las fuentes de tercera generación pueden definirse como aquellas cuyo anillo de almacenamiento dispone de numerosos espacios disponibles (denominados *secciones rectas*) para instalar dispositivos de inserción y con un haz de electrones cuya emitancia horizontal es de unos pocos nm-rad. Estos conceptos se explican a continuación.

Las secciones rectas son tramos del anillo de almacenamiento intercalados entre dos imanes dipolares consecuti-

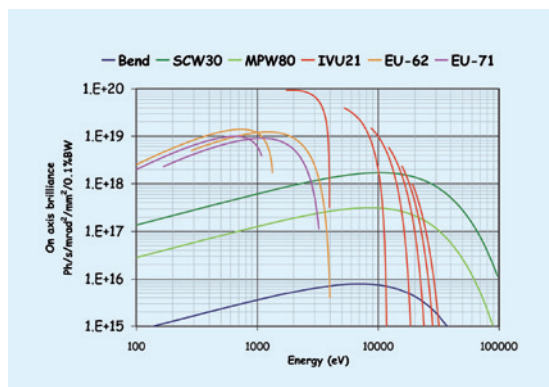


Fig. 2. Brillo en el eje de emisión como función de la energía del fotón para un imán dipolar y los distintos dispositivos de inserción de las líneas de fase 1 de ALBA, dos de las cuales están equipadas con un IVU21.

vos, donde en principio los electrones se propagan en línea recta. Su función es posibilitar la inserción de una serie de elementos magnéticos o electromagnéticos para forzar a los electrones a describir una trayectoria de forma aproximadamente sinusoidal, al cabo de la cual recuperan la misma trayectoria rectilínea original. Dichas trayectorias pueden tener bien variaciones angulares inferiores a la anchura del cono de emisión de luz, en cuyo caso se produce una intensificación de la emisión y el sistema se conoce como ondulator. Alternativamente las variaciones de ángulo en la trayectoria pueden ser mayores que la anchura del cono de luz, en cuyo caso no se produce dicha intensificación y el sistema se denomina wiggler. De este modo la inserción de uno de estos sistemas (conocidos precisamente como dispositivos de inserción) da lugar a una emisión cuyas características pueden ser ajustadas mediante la geometría e intensidad de los campos magnéticos implicados sin afectar, por definición, a los parámetros de la órbita. Esto permite que cada dispositivo de inserción (y por consiguiente su espectro de emisión) pueda ser configurado de manera individualizada, a diferencia del caso de los imanes dipolares.

Las características más sobresalientes de la luz emitida por una fuente de luz de sincrotrón, aquellas que la hacen una herramienta única para un amplio abanico de aplicaciones, son las siguientes:

- Se trata de una luz extremadamente brillante. Esto permite hacer medidas con error estadístico bajo, incluso cuando se quiere analizar muestras muy pequeñas.
- Se trata de una luz blanca, es decir, con una composición espectral que cubre amplios rangos de longitud de onda, desde el infrarrojo hasta los rayos-X duros.
- Se trata de una luz pulsada. Los electrones circulan en paquetes, cada uno de los cuales está formado por varios miles de millones de electrones que emiten de forma aleatoria fotones cuando transitan en el interior de la región con campo magnético. Esto hace que la luz sea emi-

tida durante intervalos de tiempo de fracciones de nanosegundo. El tiempo entre dos pulsos consecutivos puede variar entre el orden del microsegundo y unos pocos nanosegundos.

- La luz sincrotrón está de modo natural polarizada horizontalmente, debido a que la órbita de los electrones está contenida en un plano horizontal. Sin embargo en fuentes de tercera generación se manipula la polarización para obtener la más adecuada a cada experimento, sea vertical o circular. Ésta última se usa frecuentemente cuando se estudian materiales magnéticos.

Algunos de los parámetros clave que caracterizan a una fuente de luz de sincrotrón de tercera generación son los siguientes: energía del haz de electrones, emitancia y brillo. A continuación se explica brevemente cada uno de ellos.

La energía del haz de electrones, dados unos valores razonables para los campos magnéticos aplicados para modificar la trayectoria del haz en los puntos de emisión de luz, define el rango de longitudes de onda donde el espectro de emisión tiene intensidades útiles. La energía de 3 GeV elegida para ALBA supone una opción típica para fuentes de luz de sincrotrón de tercera generación, con un buen compromiso entre coste y rendimiento. Permite llegar a energías del haz de fotones en el rango de los 50 keV con dispositivos de inserción adecuados.

El brillo es un parámetro que se corresponde con cada uno de los focos emisores de luz de sincrotrón, es decir, con cada imán dipolar o dispositivo de inserción. El brillo se define como el número de fotones emitidos por unidad de área, ángulo sólido, ancho de banda y tiempo. El brillo es una magnitud que depende de la longitud de onda. La figura 2 muestra los espectros correspondientes a los seis dispositivos de inserción actualmente operativos en ALBA, así como de un imán dipolar.

El brillo depende de la configuración del campo magnético en la zona de emisión, de la energía del

Fig. 3. Vista aérea de ALBA con indicación de sus elementos esenciales.





Fig. 4. Vista global del LINAC de ALBA.

haz de electrones primario y del tamaño del haz de electrones en el espacio de fases. Esta última magnitud se conoce como emitancia y, como consecuencia del Teorema de Liouville, constituye un invariante de la órbita. La emitancia se utiliza frecuentemente como figura de mérito de una fuente de luz de sincrotrón [2]. Efectivamente, emitancias bajas se corresponden con brillantes altas.

Esta magnitud factoriza en un término correspondiente al eje vertical y otro al horizontal (es decir, el plano de la órbita), siendo éste último el dominante. La emitancia horizontal es un parámetro característico para cada generación de sincrotrones. Los de segunda generación tenían emitancias de unos 100 nm-rad, los de tercera de unos 3-5 nm-rad y los más recientes, algunos en fase de construcción, de 0.1-0.2 nm-rad. ALBA tiene una emitancia horizontal de 4.5 nm-rad.

Fig. 5. Booster (derecha) y anillo de almacenamiento (izquierda). Al fondo se observa cómo ambos anillos se van curvando hacia la derecha.

ALBA: infraestructuras y aceleradores

Las dimensiones del haz de electrones y, por tanto, de los haces de fotones emitidos en los distintos puntos del anillo de ALBA están en un rango inferior a los 10 μm (eje vertical). Por ello resulta esencial que todo el complejo mantenga una gran

estabilidad mecánica. Por otra parte el correcto funcionamiento de los equipos requiere también un suministro eléctrico de gran calidad. Ello hace que las instalaciones convencionales tengan de hecho una complejidad y un grado de sofisticación notables. ALBA se ubica en un conjunto de edificios con una superficie total cercana a los 30 000 m^2 . La figura 3 ofrece una perspectiva general de ALBA desde el aire.

El complejo de aceleradores de ALBA [3] consta de tres elementos: acelerador lineal (LINAC), propulsor (booster) y anillo de almacenamiento. El anillo de almacenamiento y el booster son dos aceleradores cíclicos alojados en un túnel común de paredes de hormigón, con un perímetro cercano a los 300 m, mientras que el LINAC tiene una longitud total algo inferior a los 30 m y está ubicada en un bunker propio.

El LINAC es el primer acelerador de ALBA. En él se genera el haz de electrones, que procede de un metal incandescente, con una estructura temporal pulsada. El haz se acelera mediante radiofrecuencia hasta 100 MeV. Obsérvese, comparando con la energía en reposo de un electrón ($m_e c^2 \sim 0.5 \text{ MeV}$) que este haz está ya en régimen ultrarrelativista. El LINAC genera un pulso de unos pocos nC (es decir, del orden de 10^{10} electrones) con una frecuencia de repetición de unas pocas veces por segundo (típicamente 3 Hz). La figura 4 muestra el LINAC de ALBA.

Cada uno de los paquetes de electrones generados por el LINAC entra en el booster, de unos 250 m de perímetro. En cada vuelta el paquete de electrones atraviesa una vez la cavidad de radiofrecuencia, aumentando su energía progresivamente. Tras un tiempo de vuelo total del orden de los 150 ms (es decir, aproximadamente 150 000 vueltas), los electrones han alcanzado una energía de 3 GeV. Entonces el paquete se inyecta en el anillo de almacenamiento. La figura 5 muestra el interior de túnel de aceleradores de ALBA.

El anillo de almacenamiento de ALBA tiene un perímetro de unos 270 m. En él se mantienen almacenados simultáneamente varios paquetes de electrones similares, procedentes sucesivamente del booster. Los electrones, a lo largo de su trayectoria, van perdiendo energía a causa de la emisión de luz. Dicha energía se repone mediante cavidades de radiofrecuencia cuyo aspecto puede verse en la figura 6.

Los electrones tienen una cierta probabilidad por unidad de tiempo de sufrir una interacción que los haga abandonar el haz principal. Dichas interacciones están dominadas por las colisiones con moléculas de gas residual, razón por la cual resulta esencial que el complejo de aceleradores funcione en condiciones de ultra-alto vacío. El conjunto de elementos ligados a la obtención y monitorización de estas condiciones (sistema de vacío) es uno de los componentes esenciales del conjunto.



La intensidad del haz almacenado se va atenuando con una vida media que viene determinada por la sección eficaz total de interacción por unidad de longitud de trayectoria. Dicha vida media está habitualmente por encima de las 20 horas. Pese a que la atenuación de la corriente pueda parecer pequeña, es lo suficientemente importante para que los elementos ópticos directamente expuestos al haz de fotones estén sometidos a variaciones relevantes en la carga térmica soportada. Estas variaciones pueden hacer cambiar la posición del haz, perturbando el experimento. Por ello en las modernas fuentes de tercera generación es habitual operar en un modo diferente, conocido como top-up, que consiste en reinyectar pequeñas cantidades de carga con intervalos típicos de unos pocos minutos, de manera que la corriente almacenada permanece prácticamente constante durante toda la operación del sistema. Este es el modo en el que ALBA opera desde verano de 2014.

Todos los aceleradores de ALBA están dotados de un sofisticado sistema de control que permite monitorizar todos los elementos relevantes y actuar sobre los distintos parámetros libres del sistema para asegurar su correcto funcionamiento. Por otra parte las energías de operación hacen necesario que los aceleradores queden alojados en estancias confinadas, con blindaje radiológico adecuado y cuyos accesos están dotados de sistemas de enclavamiento y seguridad, conforme a estrictas regulaciones supervisadas por el Consejo de Seguridad Nuclear.

En los puntos del anillo de almacenamiento donde la trayectoria del haz de electrones se curva de una forma sensible se produce la emisión de luz de sincrotrón. En el perímetro exterior del anillo hay un total de 34 salidas para estas emisiones de luz, cada una de ellas disponible, en principio, para equipar una línea de luz (beamline). Este número es bastante elevado y permite ir incorporando un amplio abanico de aplicaciones y tecnologías a lo largo de la vida útil de la instalación. A partir del punto de emisión se deriva una extensión rectilínea, a lo largo de la tangente del anillo, para transportar la luz emitida hasta la línea de luz. Esta conexión entre anillo de almacenamiento y línea de luz se conoce como terminación frontal (front end). La figura 7 muestra el aspecto de un front end de ALBA.

Líneas de luz de ALBA

En su configuración inicial ALBA utiliza 7 salidas (6 dispositivos de inserción y un dipolo) para usar la luz como herramienta analítica de materiales en diversas áreas de aplicación. Dos líneas adicionales están actualmente en proceso de construcción (líneas de fase 2), una de ellas utilizando la luz emitida por un imán dipolar y la otra en base a un dispositivo de inserción. En el periodo 2016-20 está previsto iniciar gradualmente la construcción

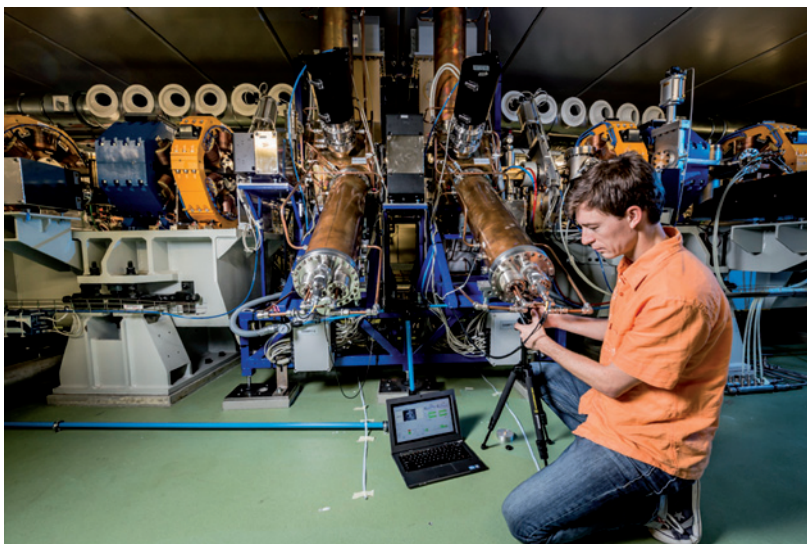


Fig. 6. Cavidades de radiofrecuencia del anillo de almacenamiento de ALBA.

de hasta cinco líneas nuevas (líneas de fase 3). No es el propósito de este trabajo el describir en detalle las líneas de luz de ALBA. Nos limitaremos a una breve semblanza de las líneas de fase 1 y 2.

Las líneas de fase 1 de ALBA pueden clasificarse en tres grandes grupos, vistas desde el ángulo de las aplicaciones científicas: líneas cuya aplicación más relevante es el campo de la Biociencia; líneas con aplicaciones en áreas muy avanzadas de la Ciencia de Materiales, en particular aspectos de estructura magnética y electrónica y Nanociencia; líneas con aplicaciones en Ciencia de Materiales entendida en sentido muy amplio, con ramificaciones en Química y diversas áreas de tipo multidisciplinar.

En el primer grupo tenemos las líneas MISTRAL, NCD y XALOC. MISTRAL [4] es un microscopio de transmisión de rayos-X de campo completo que permite registrar imágenes bidimensionales de una muestra con resoluciones espaciales de hasta unas pocas decenas de nanómetros. Optimizada para operar en la *ventana del agua*, es decir, el rango espectral comprendido entre el borde de absorción del carbono y el del oxígeno, es una herramienta óptima para obtener mapas de material biológico. Su profundidad de penetración permite abordar, sin necesidad de seccionar la muestra, problemas no accesibles a la microscopía.

Fig. 7. Vista superior del anillo de almacenamiento de ALBA (que se curva gradualmente hacia la derecha) y un front end (que se extiende en línea recta en la parte izquierda de la fotografía).



Tabla 1. Líneas de fase 1 de ALBA.

Línea	Técnica	Aplicación
MSPD	Difracción polvo alta resolución, alta presión.	Estructura materiales, difracción resolución temporal.
MISTRAL	Microscopía transmisión rayos-X.	Tomografía criogénica muestras biológicas, espectroscopía resolución espacial.
NCD	Difracción bajo y alto ángulo alta resolución.	Estructura y cambios fase fibras biológicas, polímeros, disoluciones, resolución temporal.
XALOC	Difracción rayos-X cristales macromoléculas.	Cristalografía proteínas.
CLAESS	Espectroscopías borde absorción/emisión (EXAFS, XANES, quick-EXAFS).	Ciencia Materiales, Química, resolución temporal.
CIRCE	Microscopía fotoemisión (PEEM). Fotoemisión presión cuasi-ambiente (NAPP).	Nanociencia, dominios magnéticos (PEEM). Química superficies (NAPP).
BOREAS	Dicroísmo magnético. Difracción magnética resonante.	Magnetismo, magnetismo superficies, estructura magnética.

Tabla 2. Líneas de fase 2 de ALBA.

Línea	Técnica	Aplicación
MIRAS	Microespectroscopía infrarrojo.	Biomedicina, Ciencia materiales, Química.
LOREA	Fotoemisión resuelta en ángulo.	Estructura electrónica materiales avanzados.

pía electrónica de transmisión. La superposición de imágenes bidimensionales de la misma muestra tomadas a distintos ángulos permite realizar reconstrucciones tomográficas. Adicionalmente MISTRAL permite tomar imágenes de contraste magnético y hacer mapas composicionales mediante técnicas espectroscópicas, en ambos casos con una resolución espacial al nivel de decenas de nanómetros.

La línea NCD (acrónimo para *Non Crystalline Diffraction*) utiliza la detección de la luz difractada a bajo y alto ángulo, con dos detectores bidimensionales distintos, para estudiar la estructura de materiales con regularidades espaciales aproximadamente periódicas. Algunos de los ejemplos más relevantes se encuentran en aplicaciones biológicas (estudio de tejidos fibrosos y disoluciones), pero también en otras áreas como el estudio de polímeros. Un aspecto especialmente atractivo de esta línea es que incorpora detectores de adquisición rápida (en el rango del milisegundo), lo cual permite estudiar procesos dinámicos a escalas temporales de gran interés.

En las últimas décadas la determinación de la estructura de proteínas mediante cristalografía de rayos-X ha sido el área de aplicación de la luz de sincrotrón que más ha crecido. La línea XALOC [5] está especializada en este campo. Es una línea de difracción de monocristales capaz de medir muestras de unas pocas decenas de micras. XALOC ha sido optimizada para analizar cientos de especímenes en unas pocas horas. Sus elementos clave son: una óptica de gran estabilidad, un goniómetro ultrapreciso, un brazo robotizado para realizar el cambio de muestra de forma automatizada y un detector muy estable y de gran rango dinámico.

El segundo grupo de líneas comprende a CIRCE, BOREAS y LOREA. CIRCE [6] es una línea de

rayos-X blandos ($h\nu \sim 200\text{--}3\,000\text{ eV}$) generados en un ondulator que permite seleccionar distintas polarizaciones. La línea tiene dos ramas que pueden usarse de forma alternativa. La primera rama (PEEM) incorpora un microscopio de fotoemisión con el que puede obtenerse una imagen de la superficie de la muestra con el flujo local de fotoemisión de electrones como medida de contraste. Al variar la energía del haz de rayos-X incidente se obtiene información sobre la estructura electrónica de la muestra, mientras que al comparar dos imágenes tomadas con distintas polarizaciones del haz se consigue información sobre sus propiedades magnéticas. La resolución lateral de las imágenes se mueve en el rango de las decenas de nanómetros. Esta rama opera siempre en condiciones estrictas de ultra-alto vacío, aspecto esencial al tratarse de la detección de electrones de baja energía. La otra rama de CIRCE (NAPP) utiliza también la técnica de fotoemisión. El sistema de detección de electrones está configurado de manera que, a través de una serie de diafragmas adecuados que forman parte de un sistema de bombeo diferencial, puede mantenerse la muestra en condiciones cercanas a presión ambiente sin por ello perder la posibilidad de detectar los electrones fotoemitidos. Esta configuración tiene un gran potencial para estudiar las características superficiales de muestras en condiciones *reales*, mucho más cercanas a las eventuales aplicaciones industriales que las que se pueden conseguir en un entorno estricto de ultra-alto vacío.

BOREAS es una línea que utiliza rayos-X blandos con polarización sintonizable para estudiar muestras basándose en la absorción (en su primera estación experimental) y dispersión elástica (en una segunda estación ubicada a continuación de la primera) de los propios rayos-X. Adquiriendo

espectros de absorción o patrones de difracción a energías próximas al borde de absorción de una especie atómica determinada puede obtenerse la contribución de dicha especie al magnetismo total o a la estructura magnética de la muestra.

LOREA es una línea de fotoemisión resuelta en ángulo que permite medir de forma exhaustiva la estructura de bandas de materiales complejos, con sensibilidad muy selectiva a la superficie de la muestra analizada. Estas características la hacen ideal para estudiar materiales avanzados como el grafeno, aislantes topológicos o superconductores de alta temperatura.

El tercer grupo de líneas está formado por MSPD y CLAESS. MSPD es una línea de difracción de polvo, es decir, de material policristalino con tamaño de grano mucho más pequeño que las dimensiones transversales del haz de rayos-X. Consta de dos estaciones. En la primera se estudia cómo cambia la estructura de la muestra en condiciones de alta presión. En la segunda se dispone de detectores que permiten estudiar los anillos de difracción generados por la muestra con muy alta resolución espacial, lo que posibilita acceder a detalles muy finos de su estructura a presión ambiente.

CLAESS es una línea de absorción equipada con un entorno de muestra que permite realizar, opcionalmente, experimentos de catálisis. Por otro lado está previsto equipar la línea con un espectrómetro de fluorescencia de rayos-X de muy alta resolución. CLAESS aborda campos de aplicación muy variados mediante el estudio de la composición atómica de la muestra, su estado químico y el entorno local (es decir, los aspectos estructurales locales) de cada especie atómica.

Por último la línea de fase 2 MIRAS escapa a esta clasificación en grupos por tener un carácter especialmente multidisciplinar que la ubica en un punto intermedio entre el primero y el último de ellos. En efecto, MIRAS es una línea de microespectroscopía en el infrarrojo. Su funcionamiento se basa en la medida de espectros completos de absorción en el infrarrojo con una resolución espacial en el rango de 1 μm . De este modo es posible reconocer patrones correspondientes a los niveles vibracionales de las moléculas presentes en la muestra, haciendo mapas de concentración con gran resolución espacial. Las aplicaciones son numerosas, desde el campo de la Biomedicina, pasando por la Química y la Ciencia de materiales, incluyendo áreas menos habituales como los estudios medioambientales o de objetos de Patrimonio cultural.

Los aspectos más relevantes de cada una de las líneas se resumen en las tablas 1 y 2. Las figuras 8 y 9 muestran el aspecto de una línea de luz de ALBA.

Breve historia del proyecto ALBA

El proyecto ALBA tiene como antecedente remoto una serie de movimientos, al principio de la década



Fig. 8. Elementos ópticos de la línea CIRCE de ALBA.

de 1990, orientados a conseguir que el sistema español de Ciencia y Tecnología diera un salto cualitativo y abordara el reto de construir y gestionar una gran infraestructura en un campo ligado a la Física de Aceleradores.

Ya en 1992 la Generalitat de Catalunya inició un estudio de viabilidad y, posteriormente, un programa de formación de investigadores jóvenes que, eventualmente, pudieran incorporarse al proyecto si éste llegaba a ser aprobado. Ambas iniciativas, tras un largo tiempo de maduración, tuvieron éxito.

Efectivamente, en 2002 el Gobierno de España y la Generalitat de Catalunya concluyeron un acuerdo formal para cofinanciar al 50 % la construcción y posterior operación de ALBA. A tal efecto se creó el consorcio CELLS que, desde entonces, se ocupa de la gestión del proyecto. El consorcio fue creado formalmente en 2003. Los dos años siguientes la actividad se centró en el diseño detallado de ALBA, en paralelo con un crecimiento gradual de la plantilla.

La construcción de los edificios de ALBA empezó en 2006 y terminó en 2009. Mientras tanto se fueron fabricando los distintos equipamientos científicos. Ya en 2008 se instaló y puso a punto el LINAC y se iniciaron las actividades de instalación de otros subsistemas. El booster y el anillo de al-

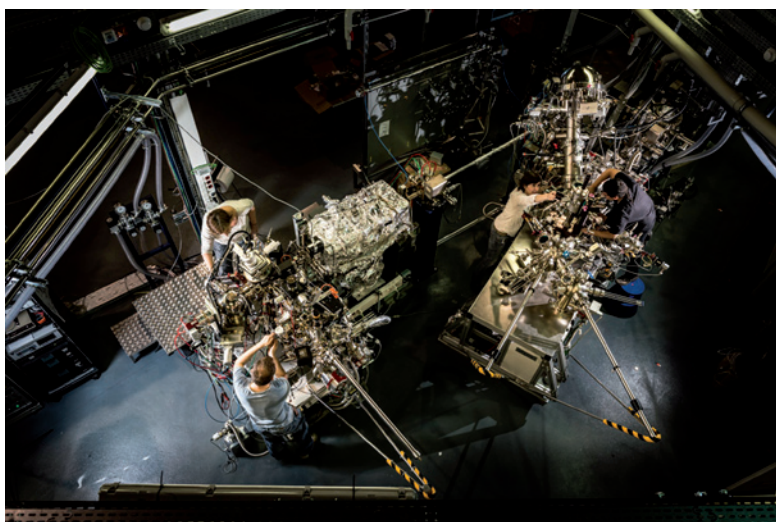
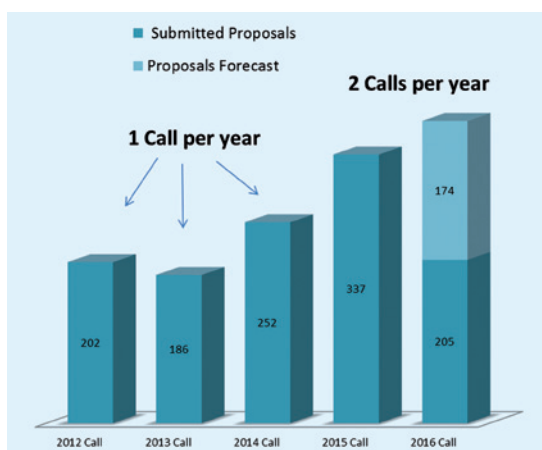


Fig. 9. Vista superior de las dos estaciones experimentales de la línea CIRCE de ALBA.

Fig. 10. Evolución temporal del número de propuestas científicas recibidas por ALBA.



macenamiento se instalaron y probaron durante 2009 y 2010. Un ejemplo que ilustra el grado de complejidad de ALBA es el cableado científico, que incluye unos 19 000 cables, con una longitud total de unos 170 km.

El año 2011 se dedicó a completar la puesta en marcha del anillo de almacenamiento y a instalar los dispositivos de inserción. Anteriormente, ya desde el año 2008, se decidió instalar las líneas de luz de fase 1 compartiendo recursos con los esfuerzos en los sistemas convencionales y de aceleradores. Los trabajos de infraestructura dieron paso de forma escalonada, en las distintas líneas, a la instalación de elementos ópticos ya en 2009 y posteriormente a la de las distintas estaciones experimentales. De este modo ya en el último tercio de 2011 se pudo empezar la puesta a punto de las líneas de luz.

En 2012, se dedicó un total cercano a las 3 300 horas de operación del complejo de aceleradores para completar la puesta a punto, realizar experimentos de validación con usuarios expertos e ir abriendo, gradualmente, las diferentes líneas a su operación regular con usuarios oficiales. Los primeros experimentos se realizaron con éxito y la primera publicación científica con datos recogidos en ALBA fue aceptada en diciembre de 2012 y publicada al principio de 2013.

El año 2013 fue el primero con operación regular. Los aceleradores operaron un total cercano a las 4 500 horas habiéndose recibido más de 500 usuarios en las siete líneas operativas. La opera-

ción de ALBA se fue consolidando, con un intenso trabajo de mejora gradual en los distintos subsistemas para conseguir un funcionamiento estable y un rendimiento óptimo. Las publicaciones empezaron a llegar, registrándose un total de 22 con tiempo de haz.

Los años 2014 y 2015 han sido una continuación, siempre en tendencia ascendente, del camino ya trazado en 2013. Las horas de operación anuales han ido creciendo hasta llegar a cerca de 6 000. El funcionamiento de los aceleradores ha ido implementando mejoras relevantes, como el inicio de operación en modo de rellenado continuo (top-up) o la inclusión de diversos algoritmos dinámicos de mejora de la estabilidad en los aceleradores. ALBA recibió a su usuario número 1 000 en junio de 2014 y dentro del año 2015 ya se han registrado más de 100 publicaciones en total. Resultados relevantes se han obtenido en áreas de conocimiento muy diversas como: Biología estructural, materiales magnéticos [7], energía [8], catálisis [9]. En la actualidad ALBA opera con una plantilla estructural cercana a las 190 personas, con una presencia internacional cercana al 20 %.

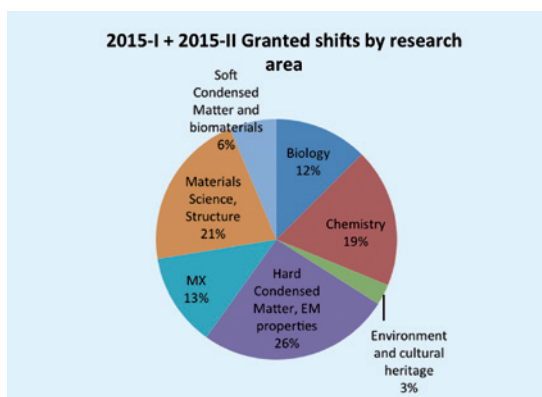
También en 2014 ALBA recibió luz verde para iniciar gradualmente la construcción de dos líneas de luz adicionales, denominadas *fase 2*. Una de ellas avanzó notablemente en su diseño durante 2014, mediante una estrecha colaboración con científicos de la fuente de luz de sincrotrón francesa Soleil. Actualmente esta línea, denominada MIRAS, está completando su instalación y tiene previsto recibir sus primeros usuarios dentro del año 2016. La segunda línea de fase 2, LOREA, mucho más compleja, empezó a ser diseñada en 2015 y tiene previsto recibir los primeros usuarios al final de 2018.

Usuarios de ALBA

La primera convocatoria pública de usuarios de ALBA se abrió a finales de 2011, con el objetivo de acoger los primeros experimentos a partir de mayo de 2012. Desde entonces se han abierto sucesivas convocatorias para 2013, 2014 y dos convocatorias por año desde 2015. En cada una de dichas convocatorias se verifica la viabilidad de los experimentos propuestos desde el punto de vista técnico y de seguridad, y se evalúan las propuestas con la participación de un panel científico internacional, con el fin de garantizar la excelencia de todos los experimentos aceptados.

La figura 10 muestra la evolución del número de propuestas recibidas en las sucesivas convocatorias. El crecimiento constante es un reflejo del creciente interés de las técnicas basadas en la luz de sincrotrón y de la percepción positiva de la comunidad de usuarios sobre las prestaciones ofrecidas por ALBA. Cabe destacar, en este último sentido, que la proporción de propuestas internacionales no ha cesado de aumentar a lo largo de las convocatorias.

Fig. 11. Porcentaje de tiempo de haz por área de aplicación en 2015.



Como puede verse en la figura 11, cerca de la mitad del tiempo de haz aprobado en 2015, tomado como año de referencia, corresponde a experimentos que podrían ser clasificados como Ciencia de Materiales (un 21 % estudios de estructura y un 26 % dedicados al estudio de propiedades magnéticas y electrónicas). Un 31 % corresponde al área de la Biociencia y materia condensada “blanda”. Un 19 % son experimentos de Química. Por último hay algunos experimentos (3 %) dedicados a estudios de Medio ambiente o Patrimonio cultural.

El caso de las aplicaciones industriales merece una explicación aparte, ya que tienen un tratamiento diferenciado en ALBA. En este tipo de experimentos, en los que una industria puede obtener beneficio comercial directo y los resultados se mantienen, en general, confidenciales, el acceso a ALBA puede conseguirse de forma más ágil. Las propuestas pasan por un estudio básico de viabilidad técnica y de seguridad y pueden obtener un acceso rápido mediante la aplicación de una tarifa. Este tipo de propuestas ha tenido desde el inicio de la operación de ALBA una presencia muy prometedora y creciente, como puede verse en la figura 12. Lo más importante de estos usuarios industriales es no tanto el hecho de que generen ingresos adicionales para ALBA como la posibilidad de mejorar la competitividad de las industrias. ALBA es, en este sentido, una gran oportunidad para fomentar la cultura de la innovación en la industria española.

Rol y perspectivas futuras de ALBA

El primer paso en el itinerario del proyecto ALBA fue culminado con éxito durante el año 2012: construir y poner en funcionamiento un instrumento con un extraordinario potencial científico y tecnológico. A partir de ese momento se ha avanzado notablemente en la obtención de un rendimiento adecuado mediante su aplicación a un programa científico-tecnológico presidido por estrictos criterios de excelencia.

Una gran infraestructura científica como ALBA puede entenderse en base a tres elementos esenciales: instrumentación única, equipo humano altamente especializado y sistema de gestión específicamente diseñado para un entorno científico-tecnológico muy avanzado con alta eficiencia y disponibilidad. ALBA es un espectador privilegiado de los límites que la instrumentación científica actual impone a la resolución de los casos científicos más difíciles y novedosos. Ello debe producir, a largo plazo, un caldo de cultivo ideal para las

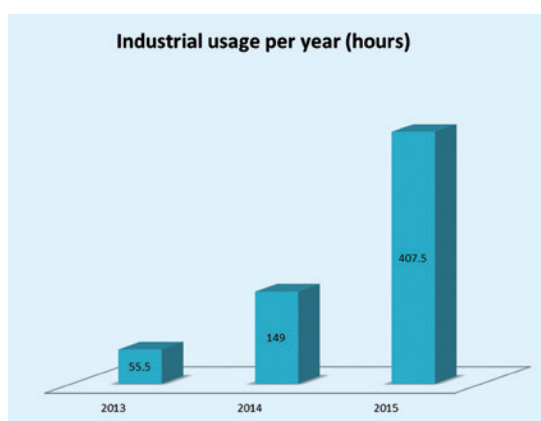


Fig. 12. Evolución temporal del número de horas de uso industrial en ALBA.

colaboraciones con la industria en el desarrollo de soluciones tecnológicas.

En conclusión, ALBA puede tomarse como una muestra muy representativa del salto cualitativo que el sistema español de Ciencia y Tecnología está abordando desde aproximadamente el año 2000. Una vez la red de centros e investigadores alcanza una cierta masa crítica, resulta estratégico crecer no sólo por acumulación, sino incorporando herramientas complementarias (grandes infraestructuras científicas) que tengan un efecto multiplicador sobre el rendimiento del sistema en su conjunto. ALBA, con sus líneas de fase 1 activas y las de fase 2 en fase muy avanzada de construcción, con un desarrollo que cabe esperar continuado a lo largo de los próximos años, incorporando gradualmente nuevas líneas e infraestructuras complementarias adecuadas para rentabilizar al máximo la inversión inicial, tiene la vocación y la posibilidad real de contribuir a ese esfuerzo de forma relevante.

Referencias

- [1] H. WINICK, *Synchrotron radiation sources: a primer* (World Scientific, 1994).
- [2] H. WIEDEMANN, *Particle Accelerator Physics I, II* (Springer Verlag, 1993).
- [3] J. BORDAS *et al.*, *NIM A* 543 (2005) 28-34.
- [4] A. SORRENTINO *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* 22 (2015) 1112-1117.
- [5] J. JUANHUIX *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* 21 (2014) 679-689.
- [6] L. ABALLE *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* 22 (2015) 745-752.
- [7] C. BLANCO-ROLDÁN *et al.*, *Nature Communications* 6 (2015) 8196.
- [8] PONROUCH *et al.*, *Nature Materials* 15 (2015) 169-172.
- [9] N. J. DIVINS *et al.*, *Science* 346, 6209 (2014) 620-23.