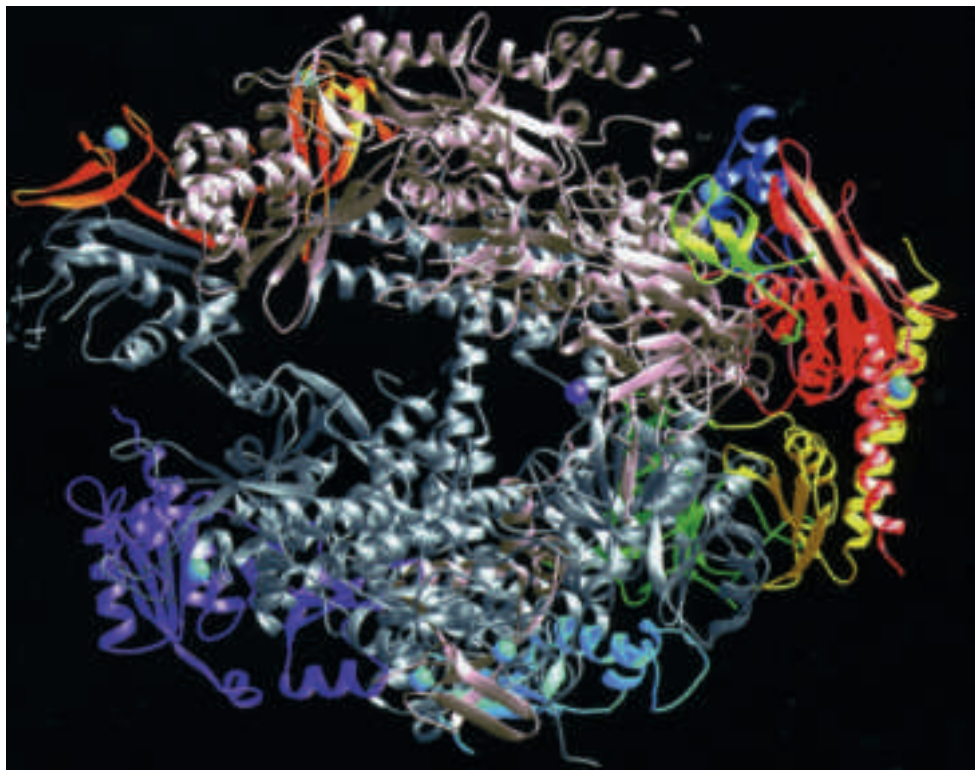


La proteína polimerasa, llamada RNA y que contiene más de 30.000 átomos, obtenida con el sincrotrón SLAC, de Stanford, California.



ALBA

El acelerador más potente del sur de Europa fue inaugurado el 22 de marzo pasado por el Presidente del Gobierno José Luis Rodríguez Zapatero, acompañado por Cristina Garmendia, Ministra de Ciencia e Innovación. Es una fuente de radiación electromagnética que se emplea en la investigación de la Física de la Materia Condensada, que acelera electrones casi a la velocidad de la luz con un techo de potencia de 3GeV, y se aplica también en el campo de la Biología y la Farmacia para estudiar proteínas. En Europa hay cerca de 20 fuentes de luz sincrotrón.

La investigación bioquímica, la biología estructural y las empresas de la industria farmacéutica necesitaban un microscopio muy superior al óptico y al electrónico para observar la estructura de las proteínas. Este tipo de microscopio se llama de sincrotrón y el recientemente inaugurado en España recibe el nombre de ALBA.

No debemos confundir un sincrotrón como el ALBA con los destinados a la física de partículas, el más importante de los cuales es el LHC de Ginebra. En este tipo de sincrotrones dos partículas con carga colisionan entre sí, mientras en el ALBA las colisiones entre partículas no interesan y se aprovecha lo que en el ciclotrón y otros sincrotrones es una pérdida energética: la emisión tangencial de luz.

En ALBA, las partículas con carga giran siguiendo trayectorias circulares mientras aceleran y, simultáneamente, producen radiación electromagnética sincrotrónica, luz tangencial, y rayos X de longitud de onda muy corta para iluminar una estructura molecular; en concreto una estructura molecular o un cristal de proteína. Esta emisión tangencial de luz se conoce, desde los años 70, gracias al sincrotrón de Hamburgo con el que se bombardearon pequeñas muestras biológicas para conocer su estructura tridimensional.

El sincrotrón

Para lograr un microscopio mucho mejor que el electrónico ha sido necesario conseguir una longitud de onda



Pasqual Bolufer

Físico

Instituto Químico de Sarriá

cortísima. El primer intento se llamó ciclotrón y se inventó en 1931. ALBA, por tanto, desciende del primer ciclotrón de 1 MeV, construido por Ernest Lawrence en Berkeley, California, en 1932.

En el ciclotrón la partícula cargada, electrón o protón, recorre una órbita circular mientras acelera en un campo magnético uniforme perpendicular a la trayectoria de la partícula. Las cargas aceleradas en trayectoria curva pierden constantemente energía, pero las cavidades de radiofrecuencia reponen la energía perdida. Son necesarios intensos campos magnéticos perpendiculares al haz de electrones para convertir la energía de la partícula en luz electromagnética. El ciclotrón tiene un tope de potencia que no puede rebasar, logrando acelerar protones a unos 600 MeV. Para superar ese tope energético se diseñó el sincrotrón.

El sincrotrón es, por tanto, un microscopio capaz de acelerar electrones en un campo magnético variable con el tiempo y según órbitas circulares de radio casi constante. Un anillo de electroimanes obliga a las partículas aceleradas a seguir una trayectoria circular y el campo magnético tiene un gradiente radial para producir el enfoque. La aceleración de los electrones se produce gracias a un sistema de electrodos a los que se aplica una frecuencia variable escogida para mantener constante el radio de la órbita, y esto se consigue al conservar el sincronismo entre la frecuencia de revolución de los electrones en su órbita y la frecuencia del voltaje de aceleración. Dicha acción se llama estabilidad de fase.

Existen tres generaciones de sincrotrones en función de la luz producida y el ALBA pertenece a la tercera generación, no solo por la intensidad de su radiación sino porque en el anillo de almacenamiento un alto porcentaje de la radiación llega a los dispositivos de inserción (wiggles y onduladores) que desvían la luz hacia secciones rectas en las que se genera luz coherente, haciendo que la partícula acelerada siga una trayectoria sinuosa, muy útil para el experimentador.

En ALBA, la energía que alimenta el Linac y el sincrotrón circular proce-

den de cavidades de radiofrecuencia. Los electrones acelerados en trayectoria curva pierden constantemente energía, pero las cavidades de radiofrecuencia reponen la energía perdida y dirigen los electrones a imanes de curvatura y onduladores-wigglers (que generan luz coherente) en el anillo de almacenamiento. Hacen falta intensos campos magnéticos perpendiculares al haz de electrones para convertir la energía del electrón en luz electromagnética.

El edificio ALBA es circular, de 140m de diámetro, y consta de 3 partes:

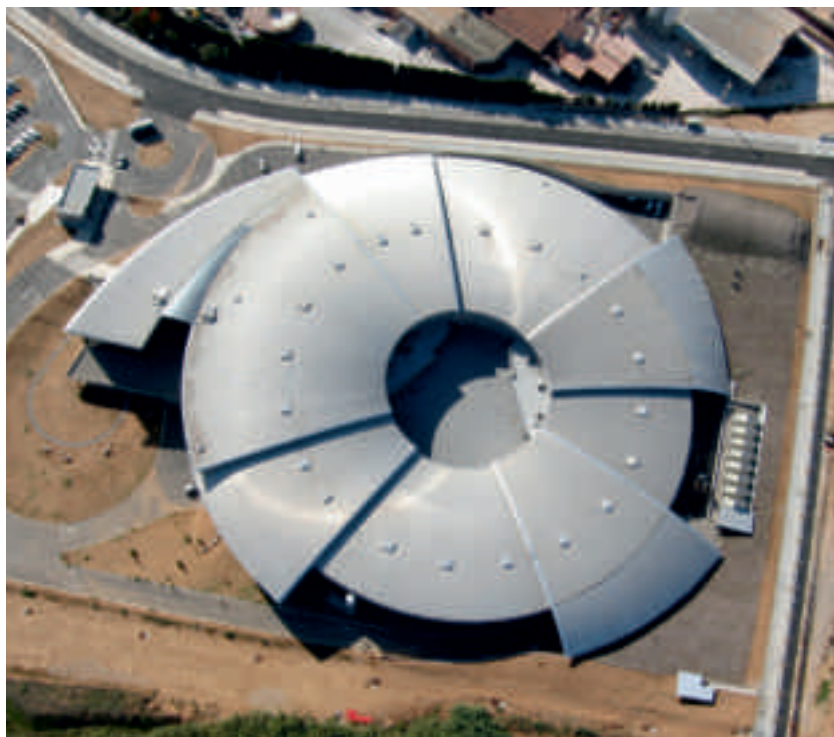
- El Linac, que acelera hasta 100 MeV a una frecuencia de 3GHz y con una cadencia de 3 Hz.
- El acelerador circular (el sincrotrón) que eleva la energía hasta el nivel final de 3GeV, un valor que corresponde a una velocidad de los electrones cercana a la de la luz y en el que los campos magnéticos están sincronizados con la velocidad progresivamente creciente del electrón, manteniéndose constante el radio.
- El anillo de almacenamiento con sus 7 Líneas de investigación (beamlines).

En el centro del edificio está el Linac (acelerador lineal), que dispara electrones hacia el acelerador circular que

produce luz blanca, es decir, luz desde el infrarrojo hasta el ultravioleta y los rayos X. Las longitudes de onda varían desde décimas de ángstrom (en el límite superior de la banda) hasta ondas de una micra. El experimentador científico debe escoger, en el anillo de almacenamiento, la longitud de onda que requiere su investigación y además su polarización: lineal (horizontal), circular (vertical), o elíptica.

Los electrones, una vez acelerados, pasan al tercer componente, el de mayores dimensiones: el anillo de almacenamiento. Actualmente está en construcción y entrará en funcionamiento en el año 2011. En el anillo hay cuadrupolos, dipolos y sextupolos para concentrar los paquetes de electrones, siendo su alto vacío de 10⁻¹⁰ milibares. El anillo mantiene los paquetes de electrones, invariables en su forma y nivel energético con una apertura del haz de luz, para un nivel energético de 3GeV, del mili-radián. Un anillo de cemento de 140m de diámetro evita que la radiación salga al exterior del edificio.

Una planta de cogeneración aporta los 12 MW para garantizar la estabilidad del ALBA y los 300 electroimanes de diferentes tipos son refrigerados con agua desionizada. La flamante



El edificio en forma de caracol de ALBA, Cerdanyola, Barcelona.

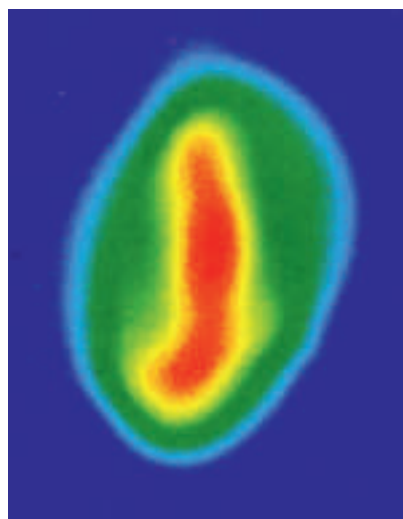
instalación, de 26 000 m², es la más cara de Europa y su mantenimiento anual supondrá un coste de 15,5 millones de euros.

La luz sincrotrón

Se caracteriza por alto brillo y alta intensidad, muchos órdenes de magnitud más que los rayos X producidos por los tubos convencionales. Las fuentes de la 3ª generación tienen un brillo superior a 10¹⁸ fotones/s/mm²/mrad²/0.1% BW. (0.1% BW indica una anchura de banda 10⁻³w, centrados en la frecuencia w). Otras de sus características son:

- alto nivel de polarización lineal o elíptica.
- alta colimación, es decir, pequeño ángulo de divergencia del haz (1 mili-radián).
- ancho margen de sintonía en energía/longitud de onda gracias a la monocromatización, desde el nivel sub-electrón/voltio hasta el mega electrón/voltio.
- emisión de luz pulsada, con una duración de pulso igual o inferior a 1 nanosegundo.

La luz sincrotrón se puede considerar como un subproducto, una pérdida de energía al curvar el electrón su trayectoria, pero un subproducto muy valioso. Se produce en los puntos del anillo de almacenamiento en los que el campo magnético curva la trayectoria del electrón.



Sección del haz de electrones del ALBA a la salida del Linac y entrada en el acelerador circular, sincrotrón. Febrero 2010.



En la foto superior, la sala de onduladores. En la foto inferior, los bloques de hormigón envuelven el anillo de almacenamiento.

El imán de curvatura genera luz, pero resulta necesario el ondulator (wiggler), ya citado antes, para lograr altos niveles de intensidad. Está constituido por una línea de imanes en línea recta que interrumpen el gran anillo de almacenamiento, con los polos N y S alternados, que fuerzan a los electrones a seguir una trayectoria sinusoidal o helicoidal, de modo que, así como un imán de curvatura genera una única curva, el wiggler induce decenas o centenares de curvaturas en la órbita del electrón.

En estos tramos rectos se sitúan las Líneas de Investigación, que extraen la luz sincrotrón hacia la sala de experimentación donde se ilumina a la muestra. Ésta, a su vez, produce la difracción y dispersión de la luz o una radiación secundaria. Las características de cada Línea están determinadas por el imán de curvatura, el wiggler y la óptica usada (focalización – monocromaticidad).

Actualmente en ALBA, con solo 7 Líneas, la separación entre ellas en el anillo de almacenamiento es de 51°, una distancia angular cómoda para el trabajo. En el futuro se podrá ampliar a 30 líneas, pero entonces la separación será de solo 12°.

El diseño del sincrotrón de la 3ª generación ha cuidado mucho estas extracciones de luz: el anillo de almacenamiento posee un alto vacío y sus imanes mantienen a los electrones unidos en forma de paquetes, aptos para iluminar a la muestra en la frecuencia de GeV y saliendo del anillo en trayectoria tangencial.

1ª y 2ª fase del sincrotrón ALBA

El Gobierno Español y la Generalitat de Catalunya decidieron en 2002 la creación de un sincrotrón de la 3ª Generación en Bellaterra. Las obras comenzaron en 2006 y en 2011 funcionarán normalmente sus 7 Líneas de Investigación. El coste hasta 2010 es de 201 millones de euros, financiado en su totalidad por entidades públicas.

El sincrotrón no puede tolerar cortes de suministro eléctrico ni huecos de tensión, por lo que dispone de un doble servicio de alimentación ininterrumpida. Tanto el diseño de la máquina como la selección de líneas, de momento solo 7, avalan una filosofía de excelencia científica, aprobada por el Comité Científico Asesor a propuesta de AUSE (Asociación de Usuarios de Sincrotrón de España). Actualmente España participa al 4% en la fuente europea de radiación sincrotrón ESFR de 6GeV (European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble).

Contará con líneas de difracción no cristalina, cristalografía de proteínas y macromoléculas, una línea de absorción de rayos X, otra para difracción de polvo de alta resolución, difracción múltiple, una línea para dicróismo circular magnético, otra de espectroscopia y microscopía de fotoemisión, así como una novedosa línea de microscopía de rayos X. Se trata de sondear la estructura de la materia a nivel de sub-nanómetro. Dispersión magnética, dispersión de rayos X de ángulo estrecho,

dispersión inelástica de rayos X, tomografía, fotolitografía para estructuras MEMS, estudios de altas presiones. En una segunda fase, ALBA tendrá hasta 30 líneas de luz sincrotrón.

La fotoemisión tiene una importante comunidad de usuarios, gracias a que es la 1ª línea de luz del sincrotrón. M^a Carmen Asensio mantuvo en LURE, París, la línea hispano-francesa durante 15 años, que fue pionera en el desarrollo de la fotoemisión resuelta en ángulo. Allí se determinó, por ejemplo, la topología de la superficie de Fermi del Superconductor Bi₂Sr-2CaCu₂O₈. Aunque España decidió no continuar su participación en el nuevo sincrotrón francés, la fotoemisión española tendrá grandes oportunidades en ALBA.

La microscopía electrónica de fotoemisión con rayos X (XPEEM) emplea los fotoelectrones emitidos por la muestra para formar una imagen. La estación XPEEM de ALBA, a cargo de Lucía Aballe, permitirá estudiar las superficies de materiales y dispositivos con una resolución espacial de pocas decenas de nanómetros. Es una Línea-Estación versátil con aplicaciones en Física y Química de superficies, catálisis, películas delgadas, magnetismo, crecimiento cristalino, sistemas de baja dimensionalidad, etc.

El ADN y los nuevos fármacos

Puede parecer que ALBA está destinado a su uso por físicos y químicos, pero tres de las siete líneas de investigación son para la Biología. Casualmente la inauguración de ALBA coincide con el 50 Aniversario del descubrimiento de la estructura proteica, para recordarnos la confluencia entre el sincrotrón y la biología.

Los primeros estudios datan de los años 70, cuando un grupo de biólogos se instaló en el sincrotrón de Hamburgo para bombardear con rayos X muestras biológicas, concretamente el músculo de un ala de un insecto. Diez años antes John Kendrew, entonces director del EMBL (Laboratorio Europeo de Biología Molecular), había resuelto la 1ª estructura tridimensional de una proteína, la mioglobina, descu-



Esquema de Alba:

- 1-En el centro hay un brazo recto, el LINAC, un acelerador lineal y el comienzo del sincrotrón. LINAC inyecta electrones en el booster, un acelerador circular.
- 2-El Booster inyecta electrones en el gran anillo de almacenamiento, formado por cuadrupolos y ondadores.
- 3- 8 Líneas de luz, para experimentación científica, 8 brazos rectos se unen tangencialmente al gran anillo de almacenamiento.

brimiento que valió el premio Nobel en 1962. Para ello irradió cristales de esta proteína con rayos X producidos con un generador convencional, el utilizado por los médicos radiólogos.

Desde la instalación del EMBL, en el sincrotrón de Hamburgo se ha resuelto la estructura tridimensional de miles de proteínas, como la RNA polimerasa que transcribe la información genética del ADN en ARN. En el desarrollo de nuevos fármacos, la luz sincrotrón permite visualizar cómo el fármaco se une a la proteína diana y la inactiva causando el efecto terapéutico.

ALBA permite, además, estudiar la difracción de cristales, resolver estructuras de proteínas, virus y otras macromoléculas con alta resolución. La difracción de bajo ángulo analizará muestras no cristalizadas a menor resolución, pero con utilidad similar. En el futuro ALBA permitirá observar células u orgánulos enteros.

¿Éxito?

En relación con esta iniciativa hay diversidad de opiniones: el Gobierno español ha asegurado una inversión de 400 millones de euros hasta 2022, pero también se especula con que la partida anual de 15.5 millones de euros para mantener la actividad del ALBA está asegurada solo en los presupuestos de este año 2010.

Esta incertidumbre hace necesaria la inversión privada pero ¿cuántas empresas acabarán instalándose por los alrededores del sincrotrón, y no precisamente españolas?. Se estima que, como máximo, entre el 5 y 10% de la investigación será privada.

En la inauguración, el Dr. Ramón Pascual, Presidente del consorcio ALBA tranquilizó a los presentes: "El primer empujón seguro que es público, pero las empresas deben ir ganado terreno". Incasol tiene previsto un espacio vivero para las empresas que tengan que usar el sincrotrón con cierta asiduidad. ■

Bibliografía

Fernando, Bartolomé. *La investigación española en materia condensada con grandes Instalaciones*. Revista Española de Física Dic.2009.

Folkers, Petra. *Bauvorbereitung des European XFEL*. DESY. Hamburgo 2008.

Garnier, Aude. *Synchrotron-Plein soleil sur la matière*. Lès défis du CEA. Paris, mars 2007.

Jackson, Rudy *Springtime at Daresbury Light Source*. Symmetry, may 2005.

Pascual, Ramón. *ALBA a synchrotron light source for Spain*. CERN Courier, November 2008.

Pascual, Ramón *La font de llum de sincrotró ALBA*. CELLS, 2008.

Plummer, Brad. *From atom smashers to X-ray movies*. Symmetry, april 2008.