

La luz sincrotrón: una herramienta extraordinaria para la ciencia

Alejandro Gutiérrez^{1,*}, José Ángel Martín-Gago², Salvador Ferrer³

¹*Instituto Nicolás Cabrera y Departamento de Física Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco, 28049 Madrid. Corr-ele: a.gutierrez@uam.es. Fax: +34 91 4973520*

²*Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Cantoblanco, 28049 Madrid. Corr-ele: gago@icmm.csic.es*

³*Sincrotrón ALBA, Edifici Ciències, C-3/041 central, campus UAB, 08193 Bellaterra, Barcelona. Corr-ele: ferrer@cells.es*

Asociación para el Avance de la Ciencia y la Tecnología en España (AACTE)
© 2004 AACTE

La luz es una poderosa herramienta para muchas de las disciplinas de las ciencias experimentales. En física, química, biología o incluso en medicina se utiliza frecuentemente algún tipo de luz como sonda para obtener información de la materia objeto de estudio. La luz producida en un sincrotrón cubre un rango continuo entre el infrarrojo y los rayos X, con una gran intensidad y con unas propiedades excepcionales. En este artículo se describe brevemente qué es y como se produce la luz sincrotrón, se describen sus propiedades más importantes y se detallan algunas aplicaciones. Finalmente, se da una breve descripción de ALBA, el futuro sincrotrón español de tercera generación.

Naturaleza de la luz

La descripción clásica de la luz la define como una onda electromagnética, con una velocidad de propagación, c , una longitud de onda y una frecuencia. Esta longitud de onda nos permite clasificar la luz en varios rangos. En orden decreciente de longitud de onda, y creciente de frecuencia y energía, podemos hablar de las regiones del infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X, etc. Coloquialmente se entiende por luz sólo la parte visible del espectro electromagnético, es decir, el rango de longitudes de onda que podemos ver con nuestros ojos. A la parte no visible se le suelen añadir prefijos, tales como *rayos* (rayos X, rayos ultravioleta, rayos infrarrojos, etc.) u *ondas* (ondas de radiofrecuencia, ondas micrométricas o micro-ondas, etc.). En general podemos utilizar el término *luz* para referirnos al rango del espectro electromagnético que va desde el infrarrojo a los rayos X.

Aunque esta descripción clásica de la luz es capaz de explicar una gran cantidad de fenómenos en los que sólo interviene su naturaleza ondulatoria, existen muchos otros que sólo pueden explicarse mediante su naturaleza corpuscular. Es lo que se conoce

como dualidad onda-corpúsculo, que afecta también a partículas de muy pequeño tamaño, como los electrones, y constituye uno de los principios de la mecánica cuántica. De esta manera, tanto la luz como los electrones pueden ser descritos por “paquetes de onda” y, por tanto, ser considerados partículas, que se denominan fotones en el caso de la luz. Análogamente, los electrones pueden ser considerados como “ondas de materia” y descritos por una función de onda, pudiendo manifestar todas las propiedades de las ondas, como la difracción, la refracción o la reflexión. Bajo esta descripción, la luz ultravioleta con una longitud de onda de 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) está formada por fotones que transportan una energía de 12,4 eV cada uno (1 eV, o electrón-voltio, corresponde a $1,6022 \times 10^{-19}$ julios). Análogamente, un haz de electrones que viaje con la misma energía, es decir, con 12,4 eV (a una velocidad de aproximadamente 2000 km/s) tiene una longitud de onda de 3,5 ángstrom, ó $3,5 \times 10^{-10} \text{ m}$. La longitud de onda de una partícula depende inversamente de su masa y, por ello, la naturaleza ondulatoria de la materia no es observable para partículas de masa mucho mayor que la de los átomos.¹

* Socio de la AACTE

La luz como herramienta

La luz interactúa con la materia de varias maneras. Esta interacción puede modificar las propiedades de la luz incidente, o bien de la porción de materia afectada por ésta, o de ambas. El análisis de la respuesta a esta interacción proporciona valiosa información sobre la materia que se estudia. Básicamente las interacciones entre luz y materia se pueden agrupar en absorción, difracción y reflexión. La absorción es la base de las espectroscopías, que proporcionan información sobre la estructura energética de la materia, y su descripción necesita la naturaleza corpuscular de la luz. Según la mecánica cuántica, un fotón sólo puede ser absorbido cuando su energía es idéntica a la diferencia entre dos niveles cuánticos de energía, siendo imposible su absorción para otros valores. Estas diferencias energéticas son características de cada elemento químico, así como de los procesos físicos que les afectan. Por tanto, la absorción de luz por la materia, y la consiguiente emisión de luz o partículas, permiten deducir la naturaleza de dichos procesos, así como identificar los componentes de la materia. Los procesos energéticos de interés van desde la excitación de fonones, de gran importancia en el estudio de la superconductividad, con energías de unos pocos meV (infrarrojo) hasta la fotoemisión de electrones internos en elementos pesados, que ocurren a varias decenas de keV (rayos X).²

La difracción, por el contrario, es una manifestación de la naturaleza ondulatoria de la luz y proporciona información estructural de la materia. Para que la difracción sea efectiva la distancia entre los “obstáculos” que la producen debe ser del mismo orden que la longitud de onda de la luz utilizada. Esto quiere decir que, para resolver estructuras del orden de la separación entre átomos (décimas de nm) tendremos que utilizar rayos X con longitudes de onda similares, es decir, con energías de decenas de keV. Gracias a la difracción se puede determinar, por ejemplo, la disposición de los átomos en un material cristalino, la periodicidad de materiales dispuestos en forma de multicapas, o la forma de moléculas complejas.³

Por último, el tercer tipo de interacción entre luz y materia, según el cual la luz sale reflejada o refractada al abandonar esta última, se fundamenta en la óptica geométrica y es la

base de las microscopías. En éstas la materia es considerada como un medio continuo, lo que es equivalente a decir que las estructuras que pueden resolverse tienen un tamaño mucho mayor que la longitud de onda de la luz con la que se observan. A medida que dichas estructuras van tomando un tamaño más pequeño comienzan a aparecer fenómenos de difracción que impiden “ver” con nitidez. Es lo que se conoce como *límite de difracción*, que, en el caso de la microscopía clásica, es decir, en el visible, es del orden de la micra. Para poder ver cosas de tamaño más pequeño hay que utilizar luz (o haces de partículas, como los electrones en los microscopios electrónicos) con longitudes de onda mucho menores que lo que se quiere observar. Los microscopios de rayos X, que se están desarrollando desde hace pocos años en instalaciones de luz sincrotrón, pueden conseguir una resolución mucho mejor que los microscopios ópticos y tienen la ventaja frente a los microscopios electrónicos de que se puede observar material biológico “vivo”, es decir, sin desnaturalizar.⁴

La luz sincrotrón

Un sincrotrón es una gran instalación que produce luz con unas propiedades extraordinarias. Se basa en un acelerador circular de partículas cargadas, generalmente electrones. Clásicamente está bien establecido que toda partícula cargada que es acelerada produce radiación electromagnética. Ejemplos cotidianos de ello son las antenas, que producen ondas de radiofrecuencia debidas al movimiento acelerado de electrones en un hilo conductor. O los generadores de micro-ondas, los klistrones, que emiten ondas micrométricas al acelerar electrones linealmente en vacío en el interior de una cavidad resonante. La velocidad, o energía, de los electrones en estos casos es pequeña, del orden de algunos cientos de voltios. La radiación emitida por una carga acelerada tiene su máxima intensidad en el plano perpendicular al vector aceleración, siendo nula en la dirección de dicho vector. Por otro lado, la distribución respecto al ángulo acimutal es homogénea, formando una especie de rosquilla cuyo agujero es coaxial con el vector aceleración (ver Fig. 1a). En un sincrotrón los electrones se mueven a una velocidad muy próxima a la de la luz, con energías del orden del GeV (giga electrón-voltio, $1\text{Gev} = 10^9\text{ eV}$). Para partículas a estas velocidades es necesario considerar la teoría de la Relatividad y aplicar las correspondientes

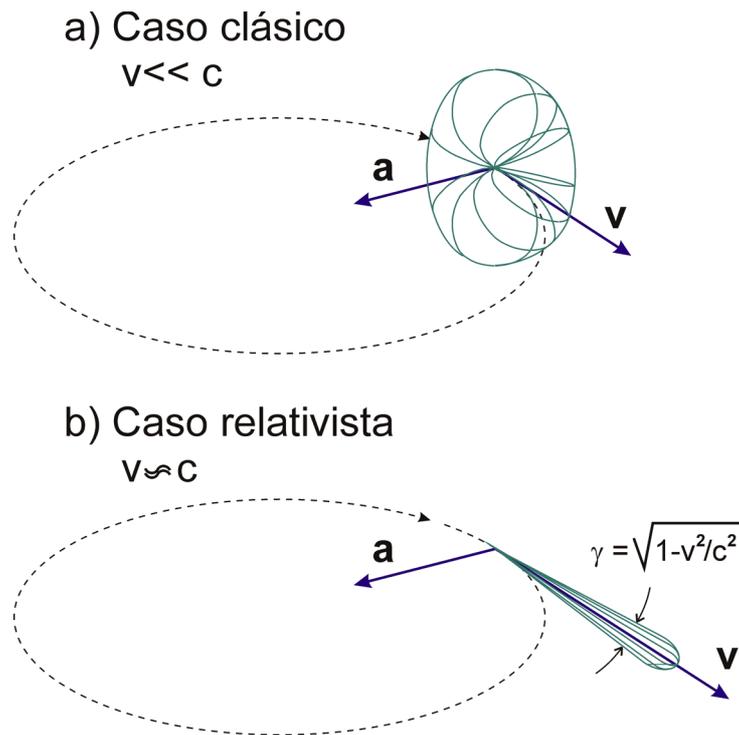


Figura 1: Distribución angular de la radiación emitida por una carga eléctrica que describe una trayectoria circular, es decir, con una aceleración centrípeta, \mathbf{a} , dirigida hacia el centro de la circunferencia. Para velocidades pequeñas no hay emisión en la dirección paralela a la aceleración, siendo máxima la intensidad para las direcciones perpendiculares a la misma. En el caso relativista, es decir, para velocidades de la partícula próximas a la de la luz, la distribución forma un cono estrecho tangente a la trayectoria, es decir, paralelo a la velocidad. La apertura de dicho cono es tanto más estrecha cuanto mayor sea la velocidad, siguiendo la expresión $\gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2}$

transformaciones de Lorentz. La deformación espacio-temporal resultante de esta transformación hace que, mientras que en el sistema de referencia de la partícula la radiación es emitida homogéneamente en el plano perpendicular a la aceleración, como en el caso clásico, en el sistema de referencia en reposo (el que nos interesa, es decir, el del laboratorio) la radiación es emitida a lo largo de un cono dirigido en la misma dirección que la velocidad de la partícula en ese instante (ver Fig. 1b). La apertura del cono disminuye a medida que aumenta la velocidad de la partícula según la expresión⁵

$$\gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

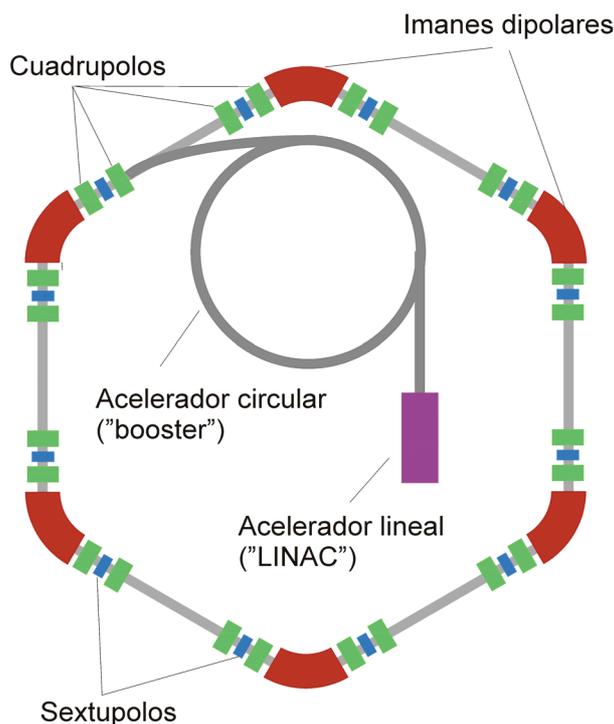
La luz sincrotrón es producida aplicando una aceleración centrípeta a un haz de electrones relativistas, es decir, sometiéndolos a un movimiento circular con velocidad constante. Se descubrió casualmente en 1947, cuando un grupo de físicos de partículas estaba tratando de optimizar las condiciones para

mantener un paquete de electrones en un acelerador circular de 70 MeV. El experimento, que había sido propuesto por Edwin McMillan, consistía en sincronizar los electrones de distintas energías, de forma que los más lentos recibieran más impulso y los más rápidos menos, formándose de este modo paquetes de electrones.⁶ McMillan bautizó este tipo de acelerador como sincrotrón. Afortunadamente, y a diferencia de otros aceleradores similares de la época, en este caso las paredes eran de vidrio y permitieron ver la luz visible que atravesaba las mismas. Dicha luz fue bautizada como radiación sincrotrón.⁷

Durante algunos años se consideró a la radiación sincrotrón como un efecto no deseado, ya que impedía aumentar de manera apreciable la energía de las partículas debido a estas pérdidas por radiación. En la década de los sesenta, algunos científicos ajenos a la física de partículas comenzaron a utilizar la radiación sincrotrón para realizar estudios de difracción durante los periodos en que los

Anillo de almacenamiento

Figura 2: Esquema típico de un anillo de almacenamiento de un sincrotrón de segunda generación. Los electrones se aceleran en dos etapas hasta llegar a su energía definitiva, momento en que son inyectados al anillo de almacenamiento. La primera etapa está formada por un acelerador lineal (LINAC es el acrónimo de "Linear Accelerator"), mientras que la segunda etapa suele consistir en un acelerador circular. Dentro del anillo de almacenamiento, la trayectoria de los electrones es desviada mediante potentes imanes de curvatura. La dispersión que se produce debido a la repulsión electrostática de los electrones se corrige mediante imanes cuadrupolares y sextupolares. En los sincrotrones de segunda generación la luz es producida sólo en los tramos curvos.



físicos de partículas "descansaban" de sus experimentos. Las instalaciones que permitieron esta utilización inicial de la radiación sincrotrón se conocen como sincrotrones de primera generación.

Los sincrotrones de segunda generación son los que se comenzaron a construir en la década de los 80, con dedicación completa a la producción de luz sincrotrón. Aunque un sincrotrón se basa en el movimiento circular de los electrones, la trayectoria de estos en los llamados anillos de almacenamiento (*storage rings*) no es completamente circular, sino que tiene tramos rectos y curvos. La luz se produce en los tramos curvos (ver Fig. 2), ya que es en éstos donde los electrones son acelerados para describir brevemente un movimiento circular. La curvatura de los electrones se realiza mediante intensos campos magnéticos producidos por imanes de dipolares o de curvatura*. Para mantener colimado el haz de electrones se utilizan también, a modo de lentes, imanes

cuadrupolares y sextupolares. El diámetro de un sincrotrón de segunda generación es del orden de decenas de metros.

Para conseguir una corriente estable de electrones dentro del anillo de almacenamiento, éstos tienen que ser previamente acelerados hasta su energía final. Este proceso suele hacerse, al menos, en dos etapas. La primera etapa de aceleración se realiza mediante un acelerador lineal, que lleva a los electrones a una energía en torno al 10 % del total. En la segunda etapa se utiliza un acelerador circular, que es el que permite alcanzar la energía final de inyección. Finalmente los electrones son inyectados al anillo de almacenamiento, en el que, en cada vuelta, se les proporciona la energía que han perdido por radiación mediante un potente generador de radiofrecuencia.⁵

Los sincrotrones de tercera generación, que comenzaron a funcionar en la década de los 90, se basan en los llamados dispositivos de inserción, que son imanes multipolares en los tramos rectos del anillo de almacenamiento. Dichos imanes multipolares producen un movimiento serpenteante del haz de electrones que hace que emita luz en cada una de las ondulaciones (tramos curvos). El resultado final es un haz de luz al que contribuyen todos los haces originados en cada ondulación y, por

* Una partícula cargada en movimiento sometida a un campo magnético perpendicular a su trayectoria experimenta una fuerza y, por tanto, una aceleración, perpendicular a su velocidad y al propio campo magnético. El resultado, si el campo es constante, es que la partícula describe un movimiento circular.

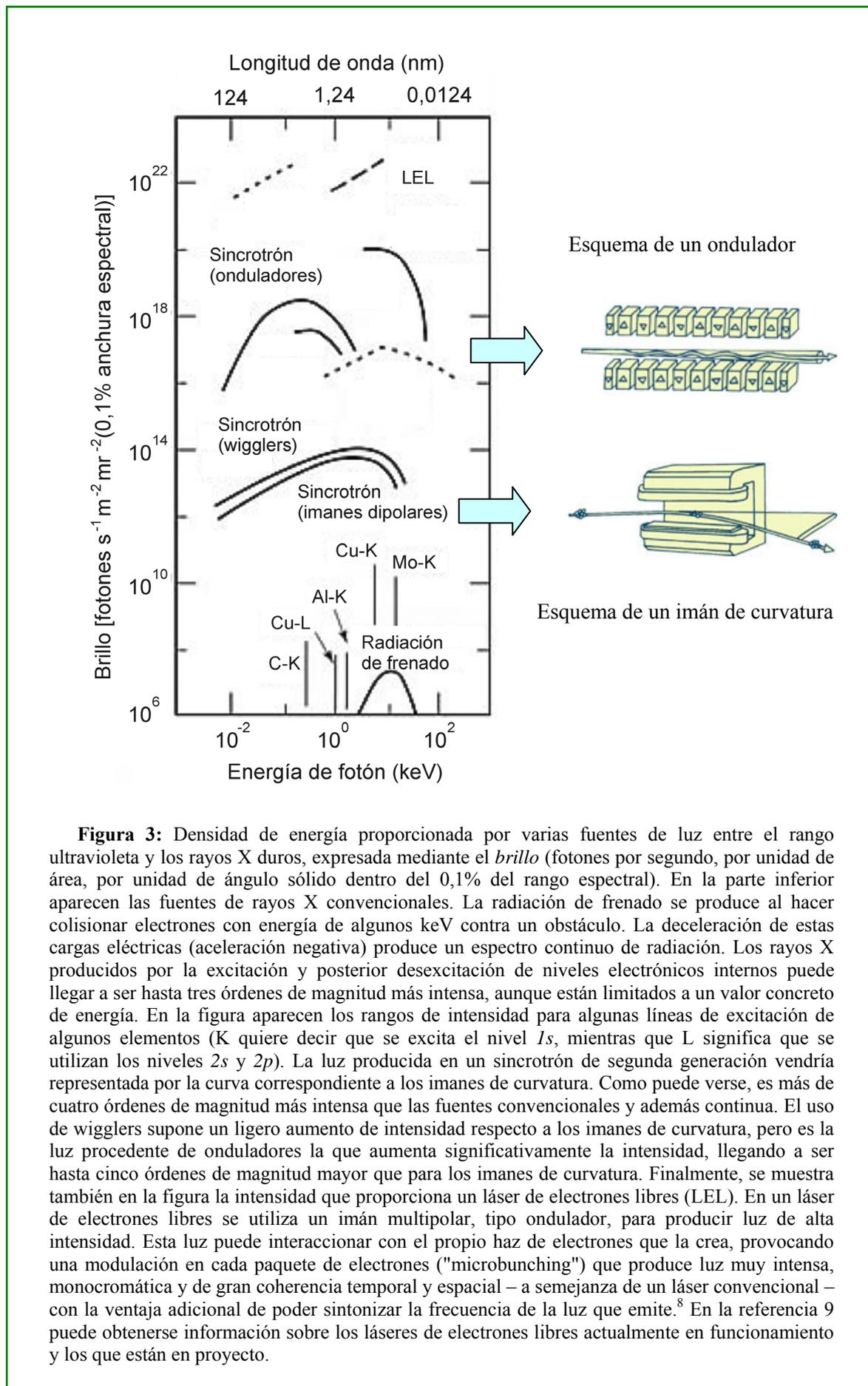


Figura 3: Densidad de energía proporcionada por varias fuentes de luz entre el rango ultravioleta y los rayos X duros, expresada mediante el *brillo* (fotones por segundo, por unidad de área, por unidad de ángulo sólido dentro del 0,1% del rango espectral). En la parte inferior aparecen las fuentes de rayos X convencionales. La radiación de frenado se produce al hacer colisionar electrones con energía de algunos keV contra un obstáculo. La deceleración de estas cargas eléctricas (aceleración negativa) produce un espectro continuo de radiación. Los rayos X producidos por la excitación y posterior desexcitación de niveles electrónicos internos puede llegar a ser hasta tres órdenes de magnitud más intensa, aunque están limitados a un valor concreto de energía. En la figura aparecen los rangos de intensidad para algunas líneas de excitación de algunos elementos (K quiere decir que se excita el nivel $1s$, mientras que L significa que se utilizan los niveles $2s$ y $2p$). La luz producida en un sincrotrón de segunda generación vendría representada por la curva correspondiente a los imanes de curvatura. Como puede verse, es más de cuatro órdenes de magnitud más intensa que las fuentes convencionales y además continua. El uso de wiguers supone un ligero aumento de intensidad respecto a los imanes de curvatura, pero es la luz procedente de onduladores la que aumenta significativamente la intensidad, llegando a ser hasta cinco órdenes de magnitud mayor que para los imanes de curvatura. Finalmente, se muestra también en la figura la intensidad que proporciona un láser de electrones libres (LEL). En un láser de electrones libres se utiliza un imán multipolar, tipo ondulator, para producir luz de alta intensidad. Esta luz puede interactuar con el propio haz de electrones que la crea, provocando una modulación en cada paquete de electrones ("microbunching") que produce luz muy intensa, monocromática y de gran coherencia temporal y espacial – a semejanza de un láser convencional – con la ventaja adicional de poder sintonizar la frecuencia de la luz que emite.⁸ En la referencia 9 puede obtenerse información sobre los láseres de electrones libres actualmente en funcionamiento y los que están en proyecto.

tanto, de gran intensidad. Este tipo de dispositivos de inserción se conoce como onduladores cuando todos los haces son coherentes y, por tanto, la intensidad final puede ser mucho mayor que la suma de todos ellos. Cuando no se da esta condición de coherencia reciben el nombre de *wigglers* (*wiggle* significa contonear, menear).⁵

En la figura 3 aparece representada la intensidad típica de la luz producida en algunos sincrotrones de segunda y tercera generación comparada con la de otras fuentes convencionales. Dicha intensidad se suele expresar mediante el *brillo*, que corresponde al número de fotones por segundo, por unidad de área y por unidad de ángulo sólido para un rango espectral del 0,1% del total. Como puede verse, el uso de onduladores en los sincrotrones de tercera generación ha supuesto un aumento de hasta cinco órdenes de magnitud respecto a los de segunda generación, basados sólo en imanes de curvatura.

Alta intensidad

Pero, ¿qué es lo que hace que la luz sincrotrón sea tan excepcional? ¿Cuál es la justificación de que existan actualmente más de 50 sincrotrones en todo el mundo y se estén construyendo varios más? ¿Se puede justificar su coste en relación con los resultados que se obtienen con este tipo de instalaciones? Hemos visto indirectamente algunas respuestas a estas preguntas en las secciones anteriores, pero las detallaremos a continuación.

En primer lugar, la luz sincrotrón tiene un rango espectral tremendamente amplio. Cubre continuamente el rango que va del infrarrojo a los rayos X más energéticos. En la Fig. 3 puede apreciarse este hecho. No existe ninguna fuente de luz convencional que cubra un espectro tan amplio. A efectos prácticos, aunque puede utilizarse la luz sincrotrón en el visible o el infrarrojo, el rango de mayor interés comprende el ultravioleta lejano y los rayos X, ya que para rangos menos energéticos existen fuentes de luz convencionales de gran calidad, como los láseres.

En segundo lugar, y tal y como se muestra en la Fig. 3, una de las propiedades únicas de la luz sincrotrón es su alta intensidad. Más concretamente, su densidad de intensidad, o brillo. Esta alta densidad de energía permite realizar experimentos en tiempos muy cortos, con una extraordinaria relación señal/ruido y con una alta resolución en energía. La realización de experi-

mentos en intervalos de tiempo muy cortos permite observar procesos en tiempo real, tales como transiciones de fase o cualquier tipo de transformación química o estructural. En los sincrotrones actuales se pueden tomar espectros de absorción o diagramas de difracción completos en décimas de segundo, cuando los mismos experimentos con fuentes convencionales pueden llevar horas o incluso días.

El considerable aumento de la relación señal/ruido que se obtiene en los modernos sincrotrones permite resolver estructuras que antes quedaban ocultas por su baja intensidad. Esto ha sido especialmente importante en la determinación de estructuras de macromoléculas mediante difracción, donde se han producido importantes avances en los últimos años gracias al uso de la luz sincrotrón. De hecho, la cristalografía de proteínas es una de las disciplinas que más demanda en la actualidad el uso del sincrotrón.

Por último, el pequeño diámetro del haz de luz, junto con su pequeña divergencia, que permiten mantener el haz con un tamaño menor de 1 mm² a varias decenas de metros de distancia, hacen posible disminuir el error al seleccionar una determinada energía de fotón, es decir, permiten aumentar la resolución en energía. Como hemos dicho, el espectro de la luz sincrotrón es continuo entre el infrarrojo y los rayos X. Para seleccionar una energía de fotón determinada se usan monocromadores, que difractan cada energía a un determinado ángulo, tal y como hace un prisma con la luz visible. Los monocromadores pueden consistir en monocristales de Si o Ge en el caso de los rayos X de alta energía, o de redes de difracción con espaciados micrométricos para rayos X blandos. Para escoger una energía determinada se coloca una rendija de salida a continuación del monocromador a un determinado ángulo. La apertura de esta rendija determina el error en la energía seleccionada. Si se quiere ganar en resolución, es decir, disminuir el error en energía, se puede cerrar más la rendija, pero si ésta se cierra demasiado la cantidad de luz que la atraviesa puede ser insuficiente para realizar el experimento. Es por ello que siempre debe adoptarse un compromiso entre intensidad y resolución. Sin embargo, un aumento en la intensidad de la fuente de luz permitirá una menor apertura de la rendija sin que la intensidad que llega al experimento disminuya, lográndose, por tanto, una mayor resolución en energía.

La alta intensidad y colimación de la luz sincrotrón permiten obtener en la actualidad fácilmente valores de resolución de energía, $E/\Delta E \approx 40000$, es decir, al seleccionar luz con una energía de 1000 eV se cometen errores $\Delta E = \pm 25 \text{ meV} = 0,025 \text{ eV}$. Esto permite realizar experimentos de espectroscopía con una precisión sin precedentes.

Polarización

Otra propiedad importante de la luz sincrotrón es que está polarizada. La polarización es lineal en el plano de la órbita de los electrones y circularmente polarizada por encima o por debajo de dicho plano. También puede obtenerse luz circularmente polarizada mediante un ondulator, mediante una configuración adecuada de los campos magnéticos.⁵ Una onda electromagnética está linealmente polarizada cuando la dirección de oscilación de su campo eléctrico tiene una orientación fija. En el caso de la luz circularmente polarizada dicha dirección gira alrededor de la dirección de propagación.¹¹

La polarización lineal es útil en sistemas con anisotropía axial, ya que se puede obtener información de las distintas propiedades del material según su orientación. Para ello basta con cambiar el ángulo de incidencia de la luz que llega al material respecto a su superficie. En incidencia normal el vector campo eléctrico es paralelo al plano de la superficie y se excitan solamente procesos paralelos a dicho plano. En incidencia rasante, el vector campo eléctrico es casi perpendicular a la superficie y, en este caso, la información obtenida es también relativa a esta dirección.¹²

Por otro lado, al realizar experimentos espectroscópicos sobre ciertos materiales magnéticos con luz circularmente polarizada a derechas o a izquierdas se observan diferencias. Se dice que dichos materiales muestran dicroísmo circular y este fenómeno proporciona información esencial sobre el magnetismo de los materiales. También puede usarse luz circularmente polarizada para realizar difracción magnética, con lo que puede obtenerse información estructural y magnética simultáneamente.¹³

Estructura temporal

El haz de electrones que circula dentro del anillo de un sincrotrón no es continuo. Está formado por varios “paquetes” de electrones separados por una cierta distancia. Por tanto, la

luz que proporciona un sincrotrón tampoco es continua, sino que está compuesta de pulsos cortos separados por periodos algo más largos sin luz. Estos periodos son de algunos nanosegundos, frente a la duración de los pulsos, que es del orden de los picosegundos.

En la mayoría de los casos, los detectores y espectrómetros que se usan en un sincrotrón no son capaces de resolver estos intervalos de tiempo tan pequeños, por lo que, en la práctica, detectan la luz como si fuera un haz continuo. No obstante, en algunos casos interesa investigar fenómenos muy rápidos que ocurren en estas escalas de tiempo. Para ello se pueden utilizar detectores especiales que pueden captar señales muy rápidas. Al mismo tiempo, para realizar este tipo de experimentos se inyecta una cantidad menor de paquetes de electrones dentro del anillo del sincrotrón, de forma que se aumenta el tiempo entre pulsos hasta algunos cientos de nanosegundos. De esta manera se pueden realizar experimentos en los que se excita algún proceso interno de una muestra mediante el pulso de luz, y se observa cómo se relaja dicha excitación durante el tiempo que transcurre hasta el siguiente pulso de luz.

Pero ¿cómo es un sincrotrón?

Hasta aquí hemos visto que un sincrotrón es una máquina capaz de producir radiación electromagnética (luz) de alta intensidad, polarizada, pulsada y con longitudes de onda que comprenden desde los rayos X hasta la luz infrarroja. Para ello se aceleran electrones hasta velocidades muy cercanas a las de la luz y se inyectan a un anillo de almacenamiento de algunos centenares de metros de diámetro. El interior de dicho anillo se encuentra en ultra-alto vacío (presiones en el interior del orden de 10^{-10} milibares), ya que es necesario eliminar casi todas las moléculas de gas residual para evitar que los paquetes de electrones se desvíen de su trayectoria al colisionar con ellas. El anillo está rodeado por una pared de hormigón con varias aberturas por las que sale la luz sincrotrón por un tubo de acero, también en vacío, que se denomina “línea de luz”.

Alrededor del anillo en el que giran los electrones se sitúan diferentes laboratorios, o estaciones experimentales, a los que llegan las líneas de luz. Una vez que la luz sincrotrón entra en una línea de luz, se selecciona la longitud de onda necesaria para realizar el correspondiente experimento mediante un

Figura 4: Vista aérea del sincrotrón de tercera generación europeo de Grenoble. Cortesía del ESRF (siglas de European Synchrotron Radiation Facility). <http://www.esrf.fr>



monocromador. Cada una de estas líneas está especializada en una determinada técnica experimental aplicada a un área de conocimiento. Así, si paseamos por el interior de una de estas instalaciones nos encontramos estaciones experimentales muy diferentes donde se realizan experimentos muy variados, desde biología, farmacología o medicina hasta química, física, ciencia de materiales o litografía aplicada a la industria.

Puesto que un sincrotrón es una instalación con un alto coste como para ser utilizado en exclusividad por los grupos que trabajan en cada una de las líneas, éstas están abiertas para que puedan ser utilizadas por cualquier grupo de investigación, tanto nacional como internacional. Para ello, los diferentes grupos presentan proyectos donde describen en detalle el tipo de experimento que pretenden realizar y los resultados que esperan obtener. Una comisión internacional de expertos se reúne para evaluar cada seis meses o un año todas las propuestas recibidas, de manera que se realizan los experimentos propuestos que consiguen mejor evaluación. Así, por una determinada línea experimental están circulando constantemente grupos de investigadores para realizar experimentos diferentes. El tiempo típico por experimento oscila entre 3 y 14 días, según la complejidad del mismo. Durante ese tiempo el suministro de luz sincrotrón suele abarcar las 24 horas al día.

Veamos a continuación algunos ejemplos de aplicaciones de un sincrotrón. En química, utilizando la estructura temporal que hemos mencionado anteriormente (un pulso de luz cada vez que un paquete de electrones pasa por la “ventana” que da a nuestra línea de luz), se

puede realizar una “fotografía” (espectro) para cada pulso de luz, de manera que se pueda seguir una reacción química con intervalos de nanosegundos. Esta técnica se ha utilizado para estudiar el comportamiento de materiales catalizadores en condiciones reales de funcionamiento, y se ha podido ver cómo durante el funcionamiento del catalizador se forman fases intermedias de muy corta vida, en las que la molécula interacciona con el sustrato.¹⁴

Otras líneas de luz estudian la materia en condiciones especiales. Se puede, por ejemplo realizar experimentos de difracción a muy altas presiones utilizando una celda de diamante, que consiste en dos cristales de diamante presionando el material de interés, que está confinado en una cápsula especial. La alta dureza del diamante permite aplicar presiones millones de veces más altas que la presión atmosférica. Estas presiones son comparables a las que se alcanzan en el centro de la tierra y, por tanto, permiten estudiar el estado de la materia a 5500°C y 3,6 millones de bares, para intentar responder a la pregunta de cuál es la estructura real de aleaciones de Fe-Ni en el centro de la tierra.¹⁵

Algunas líneas de biología estructural investigan la posición en el espacio de cada una de las moléculas que forman pequeños virus o proteínas, que es el primer paso para la realización de fármacos específicos. Por ejemplo, recientemente, D. Stuart y su grupo (Oxford, UK) en el sincrotrón europeo de Grenoble, han conseguido medir 50.000 reflexiones en un patrón de difracción de rayos X de un cristal del virus de la lengua azul, causante de muchas muertes en ganado. La

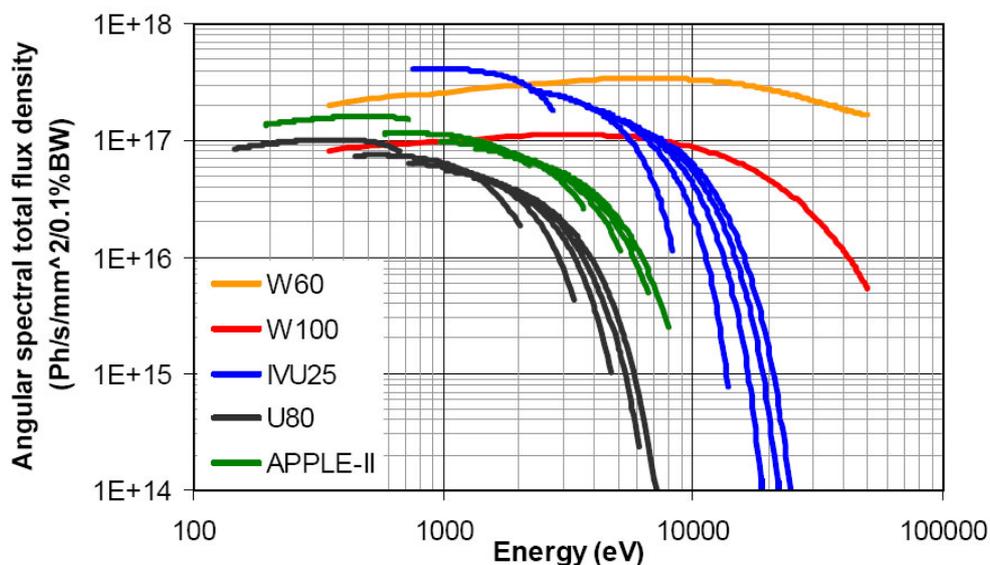


Figura 5: Distribución espectral de algunos onduladores que figuran en el proyecto actual del sincrotrón español de tercera generación, ALBA.

precisión en la posición de las moléculas es de 0,35 nm. Esta es la estructura molecular más grande que se ha resuelto hasta ahora.¹⁶

Durante los últimos años ha crecido el interés por utilizar líneas experimentales para usos médicos. Los usos principales son la mamografía y la angiografía. Cuando una de estas líneas se utiliza para diagnóstico de pacientes, se dispone en una parte del anillo con acceso desde el exterior, y presentación amigable. Las angiografías son radiografías de las arterias con elevada precisión y alta resolución, de manera que permiten la localización de trombos y estudiar la evolución de los mismos a distintos fármacos. Las principales ventajas de estas técnicas radiológicas son una muy baja dosis para el paciente (aunque la intensidad es grande el tiempo de irradiación es muy pequeño) y la calidad de las imágenes obtenidas.¹⁷

No sólo la ciencia básica, sino también la industria se beneficia de estas instalaciones. Algunas empresas multinacionales que invierten en investigación propia, deciden instalar líneas donde puedan estudiar fallos en algunos de los componentes electrónicos que fabrican, realizar máscaras mediante tratamientos litográficos tanto para aplicaciones microelectrónicas como mecánicas, o calibrar instrumentos. Recientemente en Alemania se ha construido un sincrotrón (ANKA) especializado en dar servicio a la industria.¹⁸

Por último indicar que estos aparatos no producen ningún tipo de residuo ni de radioactividad ambiental, ya que los electrones no pueden salir del tubo de vacío sin interactuar con el aire y recombinarse con sus moléculas, por lo tanto un fallo por ejemplo, de electricidad, o en el sistema de vacío, o de aceleración, sólo causa la pérdida del haz y los gritos malhumorados de los científicos que han perdido la oportunidad tan esperada de realizar sus experimentos.

ALBA: el sincrotrón español de tercera generación.

Después de casi diez años desde que se realizó la primera propuesta, el Gobierno del Estado y de la Generalitat aprobaron en 2003 la financiación de un proyecto destinado a construir y explotar un sincrotrón de tercera generación para satisfacer las necesidades de los científicos de nuestro país y para dotar a España de un instrumento científico avanzado al igual que la mayoría de países circundantes.

El sincrotrón, al que se le ha dado el nombre de ALBA, estará ubicado en la comarca del Vallés, en las cercanías de la Universidad Autónoma de Barcelona. Está previsto que comience a dar servicio en 2010. En la actualidad el proyecto está bastante avanzado y en breve comenzará la construcción. A día de hoy, varias opciones están claras dentro del proyecto en lo que respecta a los aceleradores: la energía de los

electrones será de 3 GeV, lo que permitirá que el espectro de la radiación de los onduladores llegue a los 20 keV; la emitancia horizontal, que mide cuánto diverge el haz de luz, será inferior a 5nm rad, lo que abrirá grandes para el uso de microscopías y espectromicroscopías; habrá unas 15 secciones rectas para la instalación de onduladores o wigglers; la intensidad máxima estimada será de 10^{19} fotones $s^{-1} mm^{-2} mrad^{-2}$ (0,1% ancho de banda); la circunferencia medirá 250 metros.¹⁹ La figura 5 muestra la distribución espectral calculada de algunos posibles onduladores y wigglers.

La discusión sobre las posibles líneas de luz que se construirán en la primera fase se inició en febrero de este año en una reunión nacional de usuarios de radiación sincrotrón que se celebró en Málaga.²⁰ Actualmente está en marcha un proceso de definición de objetivos científicos que debería conducir a la decisión de cuáles van a ser las cinco primeras líneas de luz que se construirán. Esta decisión debería estar tomada en la primavera de 2005. Después de las cinco primeras líneas se continuará con una segunda fase, en la que se añadirán más líneas. El número total de líneas que se podrán ubicar en ALBA es de unas 26, de las cuales unas 8-12 estarán situadas en imanes de curvatura y el resto en secciones rectas para instalar dispositivos de inserción. Puede conseguirse más información en la página de internet del consorcio para la construcción del sincrotrón español.¹⁹

Agradecimientos

Los autores agradecen a Maurizio Sacchi la lectura crítica del manuscrito.

Bibliografía

1. Para profundizar pueden consultarse algunos libros básicos de mecánica cuántica, como por ejemplo, R. Eisberg y R. Resnick "Física cuántica de átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas", Ed. Limusa (1989), o C. Sánchez del Río "Física cuántica", Ed. Pirámide (2002).
2. Véase, por ejemplo, A. Requena, J. Zúñiga "Espectroscopía" Prentice-Hall (2003).
3. C. Hammond "The basics of crystallography and diffraction" Oxford University Press (1997).
4. A.G. Michette, G.R. Morrison, C.J. Buckley, "X-ray microscopy III", vol. 67 de la serie "Springer Series in Optical Sciences", Berlin, Springer Verlag (1992).
5. H. Wiedemann, "Synchrotron Radiation" Springer Verlag (2002).
6. E. McMillan, "The Synchrotron: a proposed high energy particle accelerator" Phys. Rev. **68** (1945) 143.
7. Arthur L. Robinson, "History of Synchrotron Radiation", X-ray Data Booklet, Section 2-2. Editado por el Lawrence Berkeley National Laboratory (2001). Puede consultarse en <http://xdb.lbl.gov>
8. W.B. Colson, C. Pellegrini, A. Renieri (eds.), "Free electron lasers", volumen de la serie "Laser Handbook", North-Holland (1990).
9. http://sbfel3.ucsb.edu/www/vl_fel.html
10. A. Baraldi, G. Comelli, S. Lizzit, M. Kiskinova, G. Paolucci, Surf. Sci. Rep. **49** (2003) 169
11. E. Hecht, A. Zajac "Óptica", Addison Wesley Iberoamericana (1990).
12. A. Gutiérrez, M.F. López, I. García y A. Vázquez, J. Vac. Sci. Technol. A **15** (1997) 294.
13. E. Beaurepaire, B. Carrière (eds) "Magnetism and synchrotron radiation" EDP Sciences (Les Ulis, Francia, 1997).
14. M.A. Newton, D.G. Burnaby, A.J. Dent, S. Díaz-Moreno, J. Evans, S.G. Fiddy, T. Neisius y S. Turin, J. Phys. Chem. B **106** (2002) 4214.
15. S.K. Saxena, L.S. Dubrowinski, P. Hggkvist, Y. Cerenius, G. Shen y H.K. Mao, Science **269** (1995) 1703.
16. J. Grimes, A.K. Basak, P. Roy y D. Stuart, Nature **373** (1995) 167.
17. W.R. Dix, Prog. Biophys. Molec. Biol. **63** (1995) 159
18. <http://hikwww1.fzk.de/anka/>
19. <http://www.cells.es>
20. <http://www.ause.uma.es>