

Fuentes de Luz Avanzadas y Cristalografía

*Herramientas para el Descubrimiento
y la Innovación*

Publicado por **LAAAMP**,
"Lightsources for **Africa**, the **Americas**, **Asia** and **Middle East Project**"

Fuentes de Luz Avanzadas y Cristalografía

INTRODUCCIÓN

¿Qué son las fuentes avanzadas de radiación?	1
¿Qué es la cristalografía?	1
¿Por qué son importantes las fuentes avanzadas de radiación?	2
¿Cómo funciona una fuente de radiación?	4
La investigación en instalaciones de fuentes avanzadas de radiación	6
Enseñanza y divulgación	7

APLICACIONES

Aplicación a los nanomateriales	8
Biología estructural <i>Potentes herramientas para estudiar la biología de las enfermedades</i>	10
Aplicación a la energía	12
Estudio de los materiales sometidos a condiciones extremas	13
Aplicación a la ciencia forense	14
Paleontología <i>Estudio de fósiles antiguos</i>	15
Arqueología <i>Estudio de material antiguo</i>	16
Los centros de alta tecnología alimentan a la industria	17

REPERCUSIÓN DE LAS FUENTES AVANZADAS DE RADIACIÓN EN LA CIENCIA Y LA SOCIEDAD DE LOS PAÍSES EN DESARROLLO

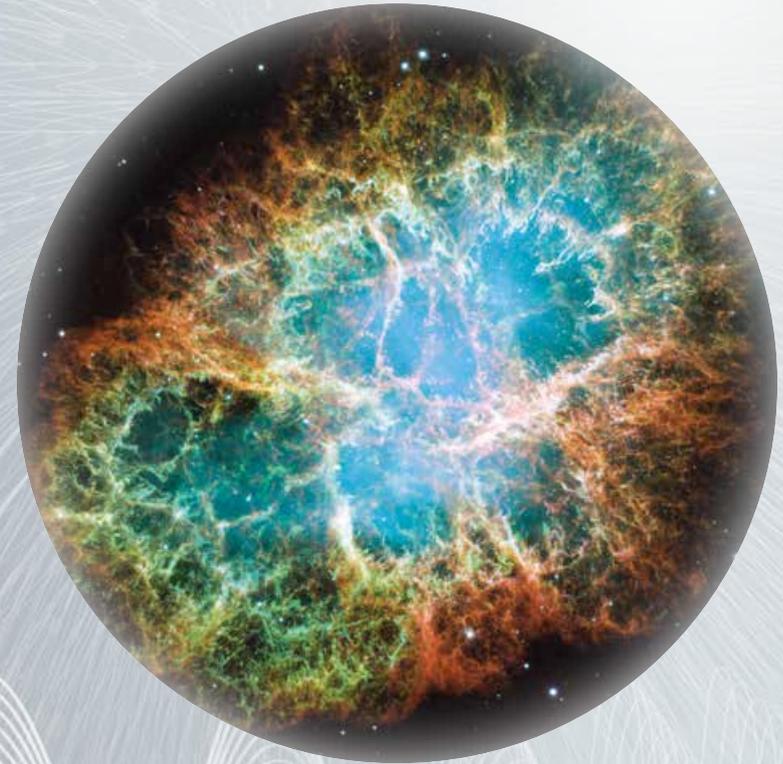
18

EMPLEO Y POSIBILIDADES DE CARRERA PROFESIONAL EN LAS FUENTES AVANZADAS DE RADIACIÓN

20

FUTURO

21



© HubbleSite: gallery, release

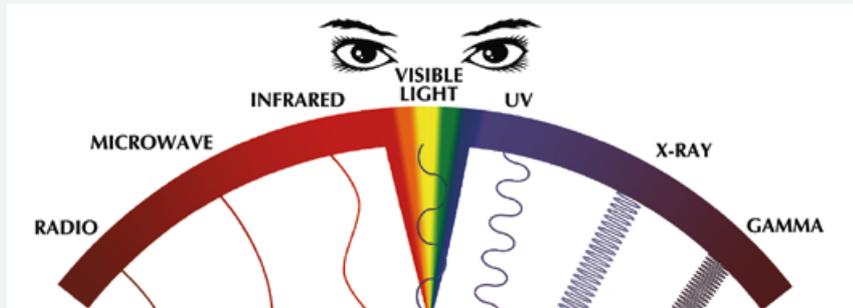
La Nebulosa del Cangrejo es el remanente de una explosión de supernova que se observó en la tierra en el año 1054 d.C. El Cangrejo está a unos 6.500 años luz de la Tierra. Los electrones cargados de energía resultantes de la explosión siguen una trayectoria curva debido al intenso campo magnético existente en la nebulosa y emiten radiación sincrotrónica, como hacen las fuentes avanzadas de radiación aquí en la Tierra.

¿Qué son las fuentes avanzadas de radiación? ¿Qué es la cristalografía?

No todos los tipos de «luz» son visibles. En ciencia y tecnología se utiliza a veces la palabra «luz» para designar la **radiación** electromagnética en general. La mayoría de las longitudes de onda del espectro luminoso no son visibles.

Las fuentes de «luz», o radiación electromagnética, generan ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

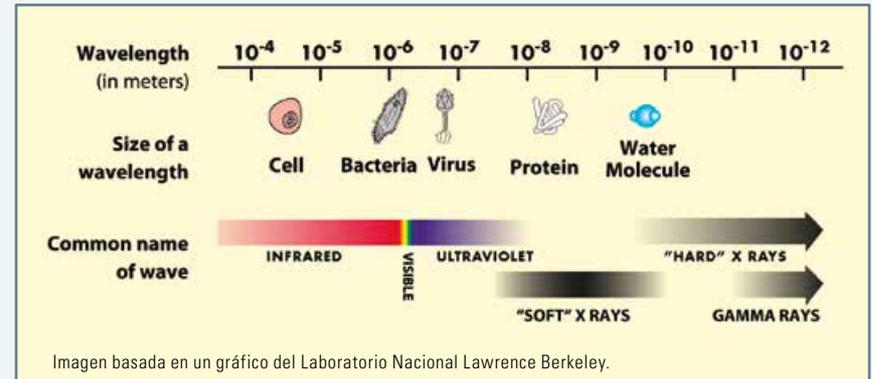
Las fuentes avanzadas de radiación son mucho más intensas que las fuentes convencionales, como bombillas o láseres tradicionales.



La cristalografía es la ciencia que estudia la disposición de los átomos en los sólidos. Existe una estrecha conexión entre la ciencia de la cristalografía y buena parte del trabajo que se realiza en las instalaciones de fuentes avanzadas de radiación.

Empleando y dirigiendo certeramente haces de rayos X generados en instalaciones de radiación sincrotrónica se obtuvieron datos de difracción de alta resolución de cristales de ribosomas, las nanomáquinas celulares que traducen el código genético en proteínas.

Ada YONATH, Premio Nobel de Química en 2009



© Lawrence Berkeley National Laboratory

Distintas longitudes de onda de radiación comparadas con el tamaño de varios objetos. Para ver un objeto necesitamos radiación cuya longitud de onda sea igual o inferior al tamaño de ese objeto.

El objeto más pequeño que podemos ver con luz visible es una bacteria. Para ver en detalle los constituyentes de una célula, por ejemplo las proteínas, necesitamos una longitud de onda más corta, como la de los rayos X.

¿Por qué son importantes las fuentes avanzadas de radiación?

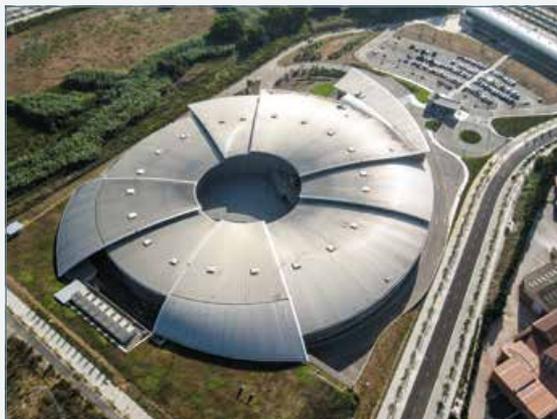
OBSERVAR la materia y desentrañar sus secretos son dos de las actividades que muestran el afán humano de entender el mundo que nos rodea. **Las fuentes avanzadas de radiación** ofrecen a la investigación científica herramientas de excepcional utilidad para explorar el mundo de los nuevos materiales y la materia viva.

Las fuentes de radiación son centros neurálgicos de la investigación básica y aplicada y cumplen una función crucial para estimular la innovación y potenciar la competitividad industrial.

Las fuentes avanzadas de radiación están revolucionando una plétora de ciencias básicas, aplicadas e industriales en ámbitos como la agricultura, la arqueología, la biología, la biomedicina, la química, los estudios del patrimonio cultural, la ingeniería, la energía, las ciencias ambientales, la ciencia forense, la geología, la ciencia de los materiales, la nanotecnología, la obtención de nuevos medicamentos, la paleontología o la física.

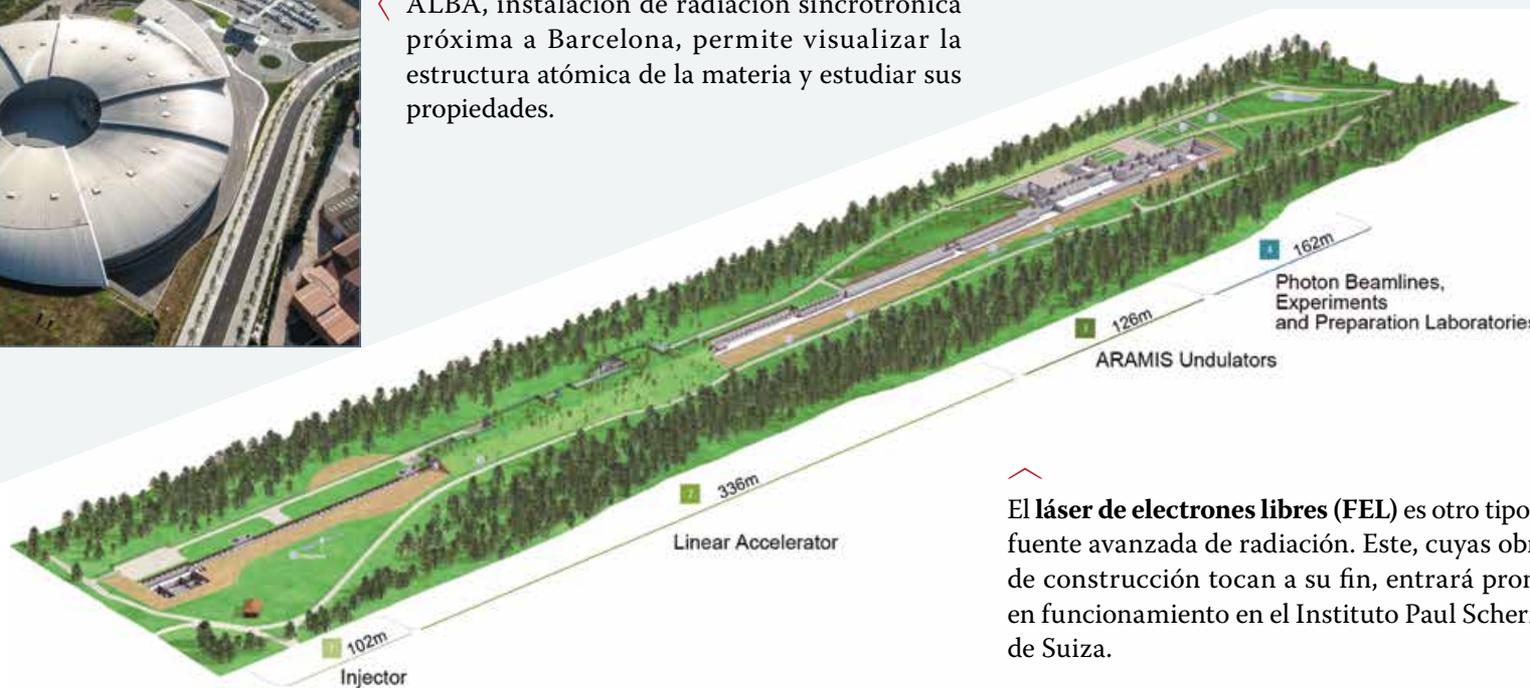
Las fuentes avanzadas de radiación son *el* instrumento por excelencia de nuestra era para caracterizar materiales. Con ellas es posible asomarse a la micro y la nanoestructura de materiales manufacturados y hacer descubrimientos que de otro modo nos estarían vetados. La industria, que lo sabe muy bien, utiliza cada vez más asiduamente las fuentes avanzadas de radiación para apoyar el trabajo de investigación e innovación destinado a obtener nuevos productos.

Estas instalaciones influyen sobremanera en la enseñanza y la capacitación de los estudiantes universitarios, nuestros futuros científicos.



Cortesía de ALBA

ALBA, instalación de radiación sincrotrónica próxima a Barcelona, permite visualizar la estructura atómica de la materia y estudiar sus propiedades.



Cortesía de Hans Braun, Instituto Paul Scherrer

El **láser de electrones libres (FEL)** es otro tipo de fuente avanzada de radiación. Este, cuyas obras de construcción tocan a su fin, entrará pronto en funcionamiento en el Instituto Paul Scherrer de Suiza.



© Adobe Stock

Las fuentes avanzadas de radiación son esenciales para hacer avanzar la investigación puntera en buen número de disciplinas y sectores industriales, respondiendo a veces directamente a las necesidades científicas, comerciales o educativas de un país o una región en un momento dado. Miles de titulados universitarios en biología, química y ciencias ambientales, de los

materiales y médicas, entre otras ramas de la ciencia, han realizado investigaciones de categoría internacional en fuentes de radiación en el mundo entero como parte de su tesis doctoral. El hecho de ofrecer semejantes recursos fue una motivación importante para que muchos países pusieran en marcha sus fuentes avanzadas de radiación a mediados de los años 80.



Cortesía del Laboratorio Nacional de Brookhaven

MÁS INFORMACION EN
<http://lightsources.org>



La National Synchrotron Light Source II (NSLS-II) (fotografía) del Laboratorio Nacional de Brookhaven (Estados Unidos), una de las fuentes de radiación más recientes y potentes del mundo, da servicio a hasta 6000 usuarios al año.



¿Cómo funciona una fuente de radiación?

Por «aceleración» se entiende un cambio en la velocidad o dirección de un movimiento. Al acelerarse, todas las partículas cargadas eléctricamente emiten radiación, o «luz».

Al ser acelerados, pues, los protones y los electrones pueden emitir radiación, pero los electrones emiten mucha más que los protones. Por este motivo en todas las fuentes avanzadas de radiación se emplean electrones.

Hay dos grandes tipos de fuentes avanzadas de radiación: las **circulares**, anillos de almacenamiento de electrones en forma de donut llamados sincrotrones, o fuentes de radiación sincrotrónica; y las **lineales**, o láseres de electrones libres (FEL).

Todas las instalaciones de radiación sincrotrónica difieren entre sí y cada una tiene propiedades hasta cierto punto distintas. En general, cabe decir que la instalación es como una cadena formada por eslabones.

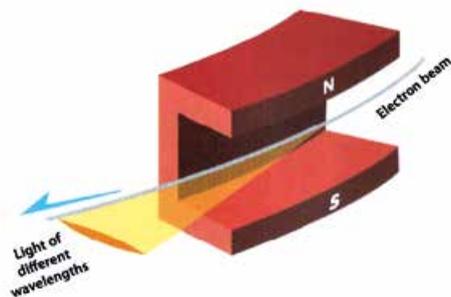


En cada eslabón de la cadena se imprime una nueva aceleración a los electrones, que son propulsados al siguiente eslabón. A continuación se muestra como ejemplo el anillo Diamond de mediana energía.

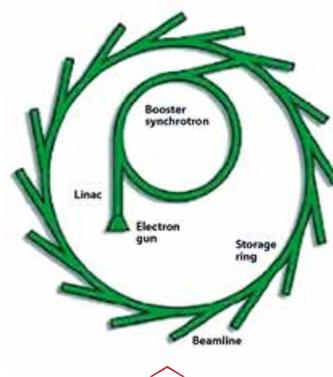
CIRCULAR. Cuando un haz de electrones pasa entre los dos polos (norte y sur) de un imán, su trayectoria se curva. La dirección se modifica y el haz emite radiación. Los electrones pueden permanecer y circular dentro de un anillo durante un tiempo de

hasta 24 horas. Al dar vueltas dentro del anillo los electrones emiten radiación electromagnética en las zonas tanto visible como invisible del espectro, o dicho de otro modo: desde las longitudes de onda muy largas (infrarrojo) hasta las muy cortas

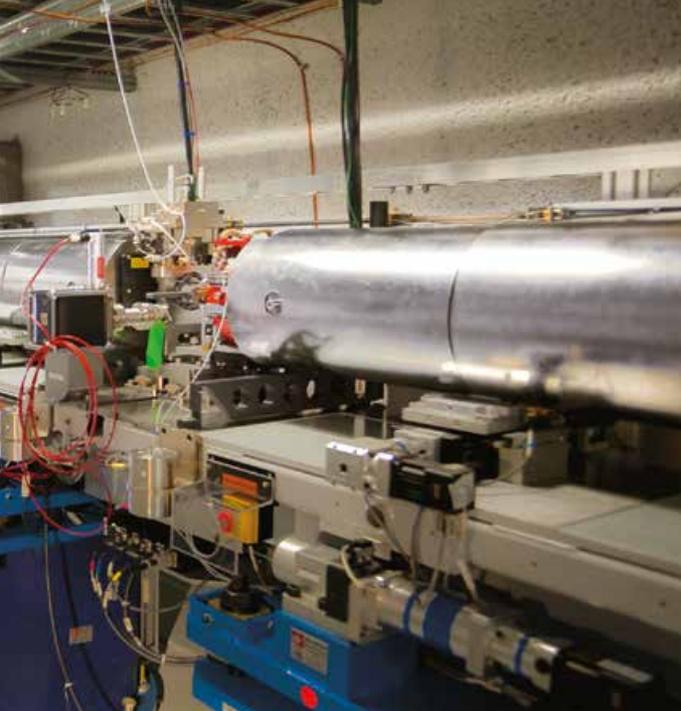
(rayos X). Dado que la radiación es emitida tangencialmente con respecto al anillo, es posible generar numerosas líneas de haz que aportan a los científicos muchos datos simultáneamente.



En este esquema se muestran las características específicas de la fuente de radiación Diamond, la instalación nacional de ciencia sincrotrónica del Reino Unido situada en el Campus Harwell de Ciencia e Innovación de Oxfordshire (Reino Unido).



Cañón de electrones. Los electrones «se evaporan» de una superficie caliente y se aceleran hasta adquirir 90 000 electronvoltios (90 keV) de energía. **El acelerador lineal** (linac) es el primero de los tres aceleradores de partículas de esta cadena: en él los electrones se aceleran hasta pasar de 90 keV a 100 millones de electronvoltios (100 MeV). **Propulsor.** Los imanes de curvatura desvían los electrones imprimiéndoles una trayectoria circular, y una fuente de radiofrecuencia los acelera hasta los 3 GeV (3 giga-electronvoltios, o 3 000 millones de electronvoltios) antes de su inyección en el anillo de almacenamiento. **El anillo de almacenamiento** consta de una serie de tramos rectos que se articulan entre sí formando ángulo para dar lugar a un bucle cerrado de unos 600 metros de circunferencia. Cada 10 minutos se inyecta un nuevo lote de electrones en el anillo, aunque en algunas instalaciones esto se hace cada varias horas. **Las líneas de haz** que circulan simultáneamente llevan radiación de distintas longitudes de onda hasta los grupos de usuarios.



Cortesía del Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC

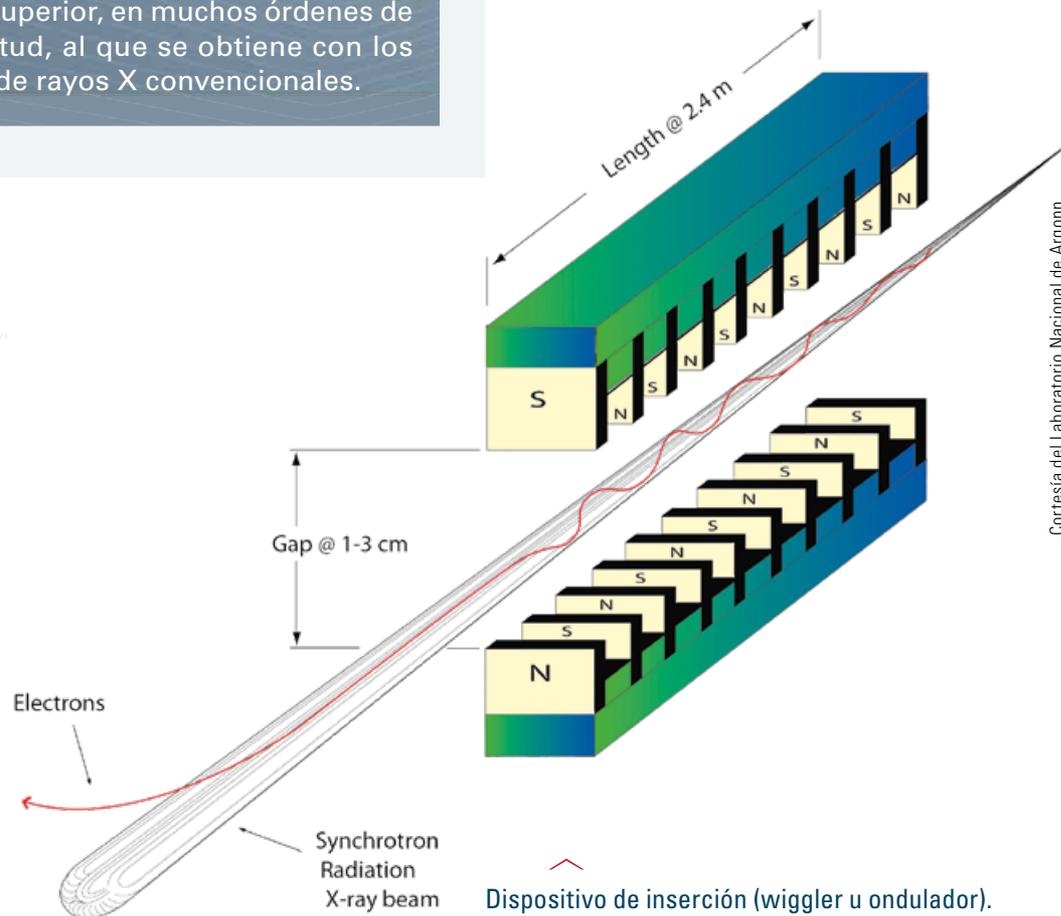
Brillo

Al comparar fuentes de radiación, una medida importante de su calidad es el «brillo», parámetro que tiene en cuenta el número de fotones producidos por segundo, así como el tamaño del haz, su velocidad de dispersión y el espectro de frecuencias o longitudes de onda presentes en él. Los haces de rayos X generados en las fuentes avanzadas de radiación tienen un brillo superior, en muchos órdenes de magnitud, al que se obtiene con los tubos de rayos X convencionales.

Se dice que un **ondulador** es un «dispositivo de inserción» porque está «insertado» en el tracto del acelerador. En las fuentes avanzadas de radiación tanto circulares como lineales se utilizan onduladores. Se trata de estructuras magnéticas periódicas provistas de una serie de imanes cuya polaridad norte-sur se va alternando. El ondulador induce la emisión de radiación sincrotrónica muy brillante y concentrada forzando al haz de partículas cargadas a hacer serpenteos (aceleraciones), u ondulaciones, al atravesar el dispositivo.

LCLS, la fuente de luz coherente de acelerador lineal del Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC de la Universidad de Stanford, California, fue uno de los primeros láseres lineales de electrones libres del mundo.

LINEAL. Producción de radiación con haces de electrones. Para generar esa radiación que tan útil nos resulta los láseres convencionales agitan los electrones que orbitan en el átomo. Los láseres de electrones libres (FEL) propulsados por aceleradores generan radiación por medio de imanes llamados onduladores que actúan excitando los electrones que se liberan del átomo. Los pulsos de un FEL son miles de veces más breves y muchas veces más intensos que los de un anillo de almacenamiento, hecho que abre un sinfín de interesantes posibilidades de investigación en numerosas disciplinas. Uno de los inconvenientes de los FEL reside en el número relativamente pequeño de líneas de haz que es posible explotar simultáneamente.



Cortesía del Laboratorio Nacional de Argonn



La investigación en instalaciones de fuentes avanzadas de radiación

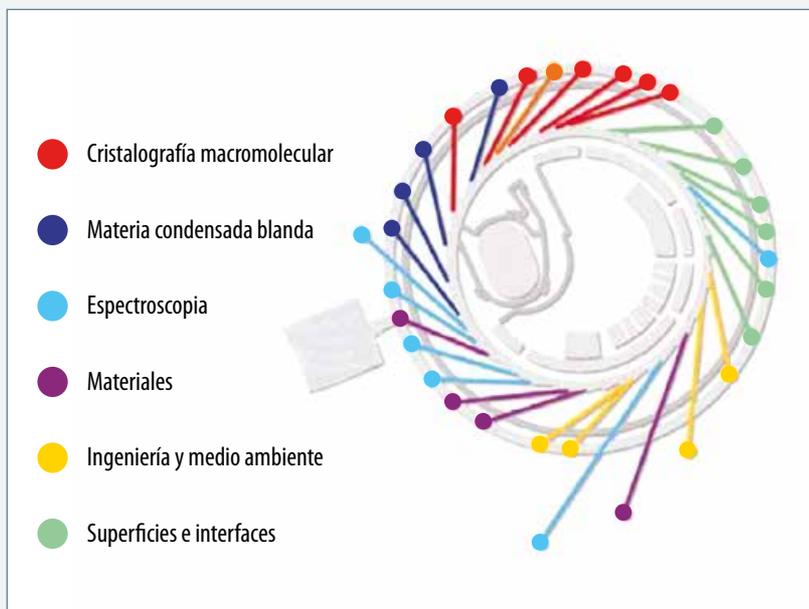


Diagrama de la fuente de radiación Diamond (Reino Unido), en el que se indica el ámbito de investigación que en general corresponde a cada línea de haz.

Ambiente de trabajo en los confines de la ciencia y la tecnología

Un grupo de científicos, en general de una universidad, pero a veces también de una empresa o un laboratorio público, a menudo como de colaboración entre varias instituciones, redacta una propuesta en la que describe el estudio e indica la línea de haz que desea utilizar y el número de horas de haz que va a necesitar. Un comité designado por el director de la instalación elige los mejores proyectos científicos, normalmente sin tener en cuenta la institución o el país de que se trate.

El grupo suele estar dirigido por un profesor e integrado por investigadores posdoctorales y doctorandos. La mayoría de las instalaciones ofrecen servicios de alojamiento, restauración y biblioteca, así como un centro informático. Se trata de verdaderos focos de enseñanza y capacitación, en los que el intercambio entre grupos de investigación forma parte de la experiencia.

Líneas de haz en la sala de experimentación de la Fábrica de Fotones KEK (Japón).



Cortesía de Hitoshi Abe, KEK

Enseñanza y divulgación

UNO de los programas de divulgación más fructíferos es el programa OpenLab (laboratorio abierto) que llevan adelante conjuntamente la Unión Internacional de Cristalografía (IUCr) y la UNESCO. Se trata de una red de laboratorios de cristalografía aplicada radicados en países del mundo entero, principalmente de África, América del Sur y Central y Asia Meridional, que tiene por objetivo posibilitar el acceso a los conocimientos adquiridos con la cristalografía en cualquier parte del mundo. El proyecto LAAAMP destina fondos a la creación de nuevos laboratorios abiertos.



Cortesía de Peter Strickland, IUCr



Cortesía de Peter Strickland, IUCr

OpenLab IUCr-UNESCO en Rabat (Marruecos), mayo de 2014.

Este laboratorio abierto discurrió según la fórmula del laboratorio itinerante: un difractor portátil fue viajando por distintas localidades del país (Rabat, El Jadida y Agadir), y en cada parada sirvió de punto de partida para organizar una clase de cristalografía, que incluía instrucción sobre el uso del instrumento y los programas informáticos conexos.

MÁS INFORMACION EN

<http://iucr.org>



OpenLab IUCr-UNESCO en el Uruguay, julio de 2014.

Ante el microscopio, varios estudiantes preparan cristales para efectuar mediciones por difracción de rayos X, mientras los demás alumnos analizan los datos de un experimento previo.

Aplicación a los nanomateriales

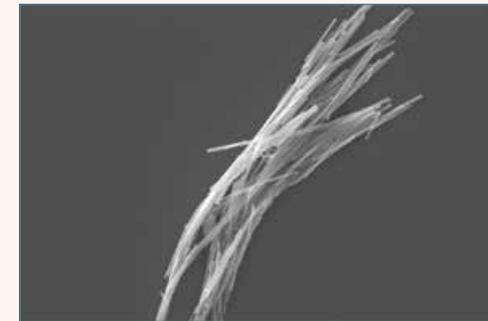
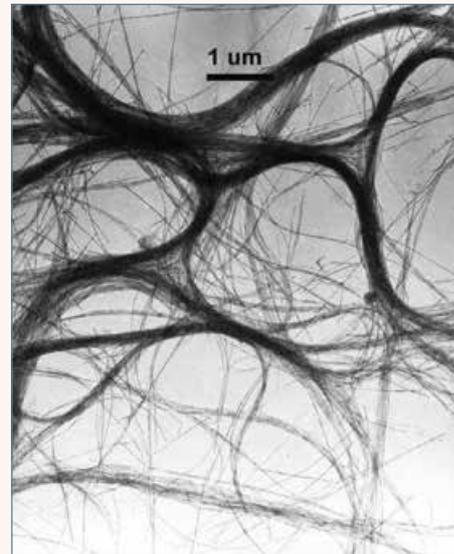
NANO es el prefijo que designa una milmillonésima parte. Un nanómetro (**nm**) es pues la milmillonésima parte de un metro y un nanosegundo (**nsec**) la milmillonésima parte de un segundo. Una forma práctica de entender la duración de un nanosegundo es recordar que es el tiempo que tardará una señal que circule por un cable o segmento de fibra óptica de 30 cm en ir de un extremo a otro.

Las proteínas son moléculas de unos nanómetros de tamaño (página 1). Los haces de rayos X blandos procedentes de fuentes avanzadas de radiación, por su parte, también tienen longitudes

de onda de unos pocos nanómetros, lo que los hace idóneos para el estudio básico de moléculas proteínicas.

Nanotecnología y nanomateriales son términos genéricos que designan la concepción y creación de materiales cuyo uso depende de la estructura que presenten a escala nanométrica, lo que en general corresponde a 100 nanómetros como máximo. Se trata de dispositivos o sistemas que se obtienen manipulando la materia a la escala del átomo o la molécula o de materiales que contienen estructuras de tamaño ínfimo. Las propiedades físicas y químicas de los

nanomateriales pueden diferir de las que presenta el mismo material en su forma indiferenciada. Cada vez hay un mayor número de productos obtenidos por nanotecnología o que contienen nanomateriales. Las aplicaciones actuales van desde la atención sanitaria (administración dirigida de fármacos, medicina regenerativa o técnicas de diagnóstico) hasta el sector de los cosméticos, pasando por la electrónica, el sector textil, la tecnología de la información o la protección del medio ambiente. Los nanomateriales están presentes en muy diversos productos, desde embalajes de alimentos o apósitos para heridas hasta complementos alimentarios.



Imágenes de nanocable obtenidas por la Dra. Öztürk

Özgül Öztürk en plena medición de la difracción de rayos X en polvo para estudiar el efecto del dopaje en nanocables semiconductores, labor que efectuó en la Instalación Europea de Radiación Sincrotrónica (ESRF) de Grenoble. La Dra. Öztürk preside el Comité Regional del Oriente Medio del proyecto LAAAMP, así como el Comité de Usuarios de SESAME.



Cortesía de Elettra Sincrotrone

El sincrotrón Elettra de Trieste (Italia) es un centro internacional de investigación que presta servicio a círculos científicos e industriales. Alberga dos fuentes avanzadas de radiación: FERMI, un láser de electrones libres, y Elettra, un anillo de almacenamiento. La radiación generada es transferida a más de 30 estaciones de experimentación en especialidades de disciplinas como la química, la microscopía, la ciencia de los materiales, la electrónica o la tecnología de la información.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y Elettra construyeron y explotan conjuntamente una línea de haz y su estación terminal de fluorescencia de rayos X, que ofrece posibilidades de investigación y capacitación avanzada a científicos de países en desarrollo y crea vínculos entre esos científicos y grandes grupos de investigación existentes.

La invención y el desarrollo de los láseres de electrones libres (FEL) ha abierto un universo fantástico de posibilidades para la investigación básica. Los pulsos extremadamente rápidos del FEL, de una duración de apenas 30 femtosegundos (un femtosegundo es ¡una millonésima parte de un nanosegundo!), permiten filmar procesos moleculares básicos en tiempo real.

La fotosíntesis inducida por la luz solar es la fuente de energía de todas las plantas verdes. Con la fuente de luz coherente de acelerador lineal (LCLS) de la Universidad de Stanford se obtuvo un «vídeo molecular» de un complejo molecular bacteriano que cataliza la fotosíntesis descomponiendo el agua en moléculas de hidrógeno y oxígeno. Un conocimiento más profundo de la fotosíntesis podría ser útil para fabricar células solares más eficaces e incluso hacer realidad algún día el sueño de la fotosíntesis artificial.



Biología estructural

Potentes herramientas para estudiar la biología de las enfermedades

PALUDISMO

SIRVIÉNDOSE de la fuente avanzada de protones del Laboratorio Nacional de Argonne, los investigadores del Centro Médico Southwestern de la Universidad de Texas contribuyen a la lucha contra el paludismo, una enfermedad que mata a millones de personas. Concretamente, estudian el funcionamiento de una proteína del sistema inmunitario del mosquito que actúa contra el parásito causante de la enfermedad.

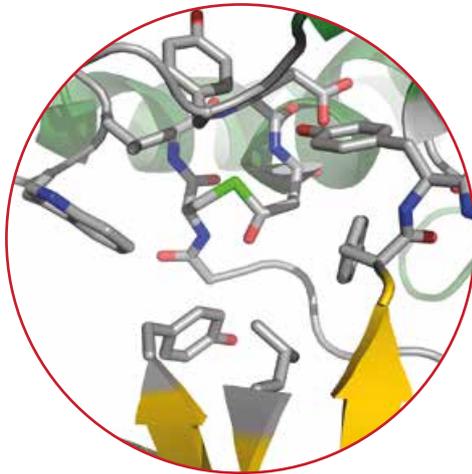
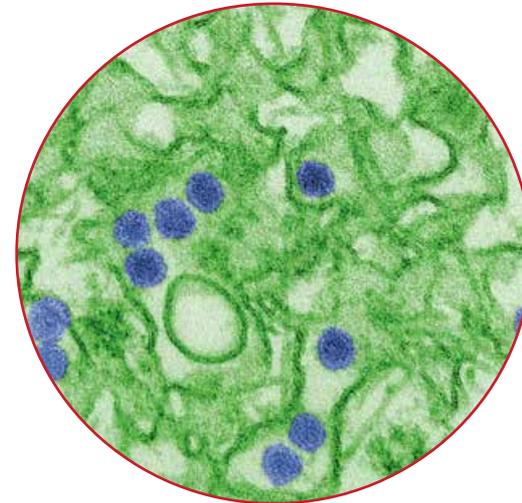


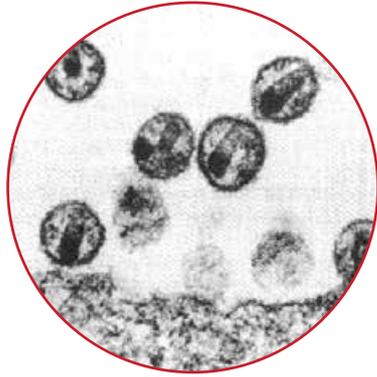
Imagen cedida por Richard Baxter y Johann Deisenhofer.

ZIKA

EL VIRUS del Zika, transmitido por mosquitos del género *Aedes*, activos en las horas diurnas, se ha convertido ya en un flagelo de dimensión mundial. En la imagen, coloreada digitalmente, se observan partículas víricas (en azul) de unos 40 nm de diámetro. En el Laboratorio Brasileño de Radiación de Sincrotrón los científicos están investigando métodos para combatir la enfermedad.



Cortesía de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades, Departamento de Salud y Servicios Sociales de los Estados Unidos de América.

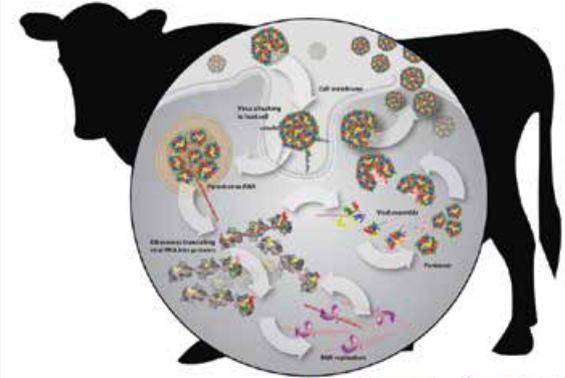


Cortesía de la Fuente de Radiación de Sincrotrón del Laboratorio Nacional de Brookhaven

VIH/sida

Hay en el mundo alrededor de 35 millones de personas que viven con el VIH, un virus que se adapta y muta continuamente, lo que plantea constantes quebraderos de cabeza a los investigadores. Provistos de imágenes claras del virus y las proteínas que lo forman, obtenidas gracias a una fuente de radiación, los científicos están desentrañando ahora los mecanismos del cuerpo para combatir el virus, con el fin último de producir medicamentos antivirales más eficaces.

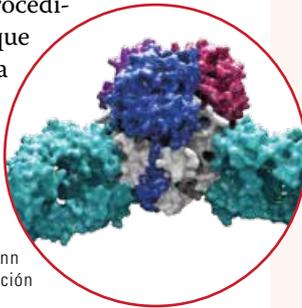
Fiebre aftosa



Cortesía de la fuente de radiación Diamond

LASSA

La perseverancia da sus frutos en la guerra contra el mortífero virus de Lassa que se libra desde la Fuente de Radiación Sincrotrónica de la Universidad de Stanford. Las investigaciones permitieron obtener la primera imagen de la historia de su escurridiza proteína vírica. En la imagen, un anticuerpo procedente de una persona que sobrevivió a la infección (azul claro o turquesa) inactiva la proteína de superficie del virus. Este trabajo señala el camino para concebir procedimientos de vacunación que induzcan una respuesta inmunitaria protectora.



Cortesía del Laboratorio Ollmann Saphire del Instituto de Investigación Scripps.

ÉBOLA

La enfermedad del Ébola, fiebre hemorrágica de los primates y el ser humano causada por el virus del mismo nombre, se transmite por contacto directo con los líquidos corporales de una persona o animal infectado. El mayor brote registrado hasta la fecha es la epidemia que afectó el África occidental entre diciembre de 2013 y enero de 2016, que en marzo de 2016 dejó oficialmente de constituir una emergencia sanitaria. En mayo de 2017 surgió otro brote en África, concretamente en la República Democrática del Congo. Provistos de los datos obtenidos gracias a fuentes avanzadas de radiación, los científicos ayudarán a derrotar al Ébola.



Fuente: PureLife Pulse. PureLife es un fabricante de productos de salud e higiene

CIENTÍFICOS de la fuente de radiación Diamond y la Universidad de Oxford han elaborado una vacuna contra la fiebre aftosa, enfermedad vírica que en 2001 causó un brote en el Reino Unido que se saldó con la muerte de más de 7 millones de cabezas de ganado. A escala mundial, todavía es una de las enfermedades del ganado económicamente más devastadoras. Es endémica en África Central y algunas zonas del Oriente Medio y Asia. En la imagen se muestra el ciclo vital del virus.

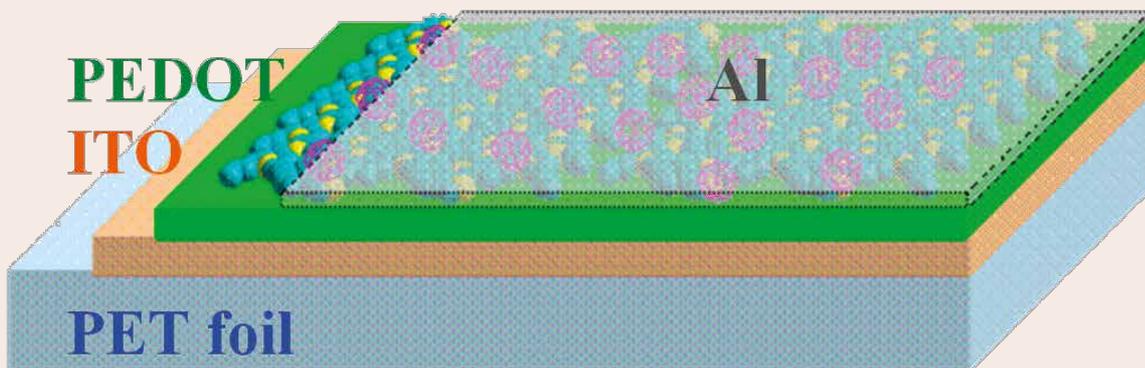
Aplicación a la energía

EL MUNDO MODERNO es cada vez más voraz en energía, pero las actuales reservas de combustible tienen un límite. Uno de los principales desafíos del siglo XXI es el de proporcionar a la población mundial la energía que necesita sin que ello suponga aumentar sensiblemente la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero. Una fracción sustancial de esa energía deberá provenir de células solares que aprovechen los baños de sol que recibe nuestro planeta. Las células fotovoltaicas orgánicas son muy prometedoras de cara a la producción de paneles solares ligeros y eficaces en relación con el costo.

Para encontrar nuevas fuentes de energía y mejorar el rendimiento y funcionamiento de los sistemas existentes es preciso conocer en detalle su estructura y comportamiento a la escala microscópica. Este es un ámbito de trabajo en el que los potentes haces de rayos X de una fuente de radiación sincrotrónica cumplen una función primordial.

En muchas instalaciones de fuentes de radiación se investiga para conocer mejor y perfeccionar los materiales multicapa que forman una célula solar orgánica. Uno de estos lugares es el Centro

de Investigación en Ciencias Moleculares de la Universidad de Puerto Rico, que encabeza las actividades del proyecto LAAAMP para promover en el Caribe el conocimiento científico ligado a las fuentes de radiación y la cristalografía.



Cortesía de Kivirus en la Wikipedia inglesa

En una célula solar orgánica o plástica, los principios de la electrónica orgánica (rama de la electrónica que se ocupa de pequeñas moléculas orgánicas o polímeros orgánicos que conducen la electricidad) se aplican a la absorción de luz y el transporte de carga para transformar la energía solar en electricidad gracias al efecto fotovoltaico.

Los acrónimos de la imagen son abreviaturas de los compuestos utilizados, que ofrecen la ventaja de su flexibilidad y su pequeño costo. Para una parte del trabajo de desarrollo de estos paneles solares se utilizan fuentes avanzadas de radiación.



© Shawn Hempel - stock.adobe.com

Los vastos conjuntos de paneles solares son cada vez más habituales.

Estudio de los materiales sometidos a condiciones extremas

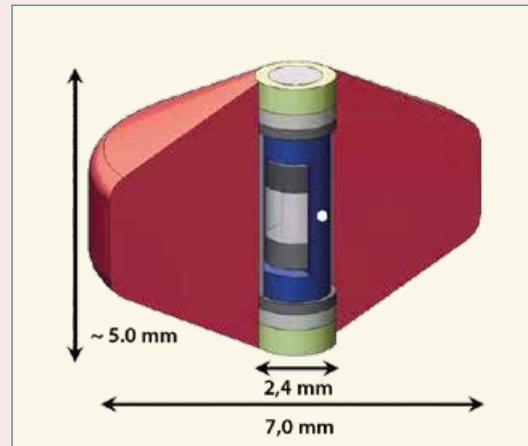
EL ESTUDIO de los efectos de la presión y la temperatura sobre las propiedades de un material es fundamental. Estos estudios son útiles para abordar numerosos problemas en ámbitos como la física y la química de la materia condensada, las ciencias de la Tierra y planetarias o la ciencia y tecnología de los materiales.

La investigación relativa a las altas presiones y temperaturas, es de gran importancia a la hora de estudiar la composición, las condiciones térmicas y las propiedades del interior de la Tierra y otros planetas. En estos estudios se someten rocas y otros materiales que puedan formar parte del manto terrestre a determinadas condiciones de presión y temperatura y se analizan sus propiedades. Estos datos, junto con los de observaciones geofísicas y geoquímicas, son indispensables para comprender el interior de los planetas y elaborar modelos al respecto.

La radiación sincrotrónica es lo bastante potente como para atravesar las paredes muy absorbentes de las vasijas de presión en que están contenidas las muestras.

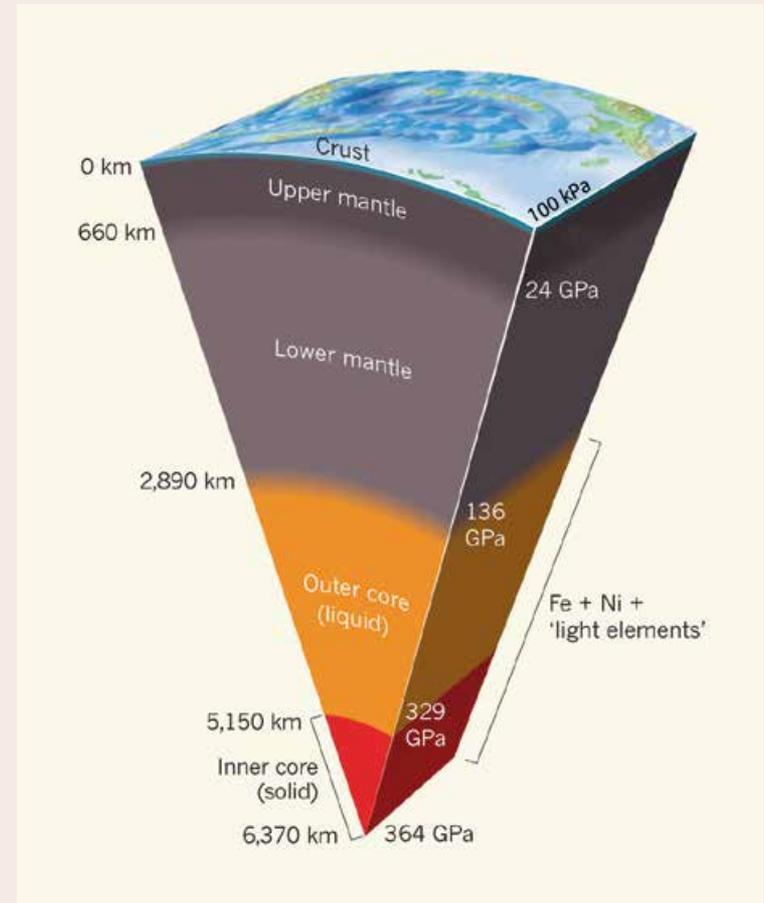
Además, los haces de radiación muy brillante son idóneos para lograr una resolución del orden de micrómetros en el enfoque, necesaria para escrutar las muestras de ínfimo tamaño que hay que utilizar en los estudios a altas presiones.

Un grupo de la Universidad de Johannesburgo ha realizado varios estudios de este tipo empleando los haces generados en la Instalación Europea de Radiación Sincrotrónica (ESRF) de Grenoble (Francia). En 2013 Sudáfrica se afilió a la ESRF en calidad de Asociado Científico.



Celda mecánica para exponer al haz de radiación materiales sometidos a altas presiones.

Cortesía de M. van Kan Parker et al., *Nature Geosci.* 5, 186 (2012) (ESRF).



Cortesía de Thomas Duffy, *Nature*, Nov. 23, 2011

^ Corte de las entrañas de la Tierra. El manto inferior va desde los 660 km a los 2.800 km de profundidad. Las unidades de presión son gigapascales (GPa) (un GPa equivale aproximadamente a 10.000 veces la presión atmosférica al nivel del mar).

Aplicación a la ciencia forense

LA RADIACIÓN SINCROTRÓNICA ofrece una herramienta para estudiar rastros indiciarios, esto es, la presencia de elementos como vidrio, residuos de disparos, pigmentos o componentes biológicos como pelo o cabello humano. Con ella es posible obtener imágenes de gran resolución y sensibilidad. La posibilidad de ajustar con precisión el nivel de energía (longitud de onda) permite aplicar potentes técnicas de

caracterización y cartografía químicas por espectroscopia de absorción de rayos X. Estas técnicas se prestan especialmente al trabajo con muestras de pequeño tamaño.

Análisis de pelo o cabello. Ciertos componentes que están presentes a niveles ínfimos en el torrente sanguíneo se incorporan a las células del pelo en crecimiento situadas en el

bulbo piloso. A medida que el pelo va creciendo, cada segmento de crecimiento se desplaza hacia afuera, generando así una cronología de las concentraciones sanguíneas del individuo. El pelo y el cabello nos aportan mucha información, por ejemplo sobre los alimentos ingeridos, la exposición a contaminantes, los efectos de enfermedades o rasgos ligados al consumo de medicamentos, drogas o productos dopantes.

LO ÚLTIMO EN FUENTES AVANZADAS DE RADIACIÓN

EDICIÓN INTERNACIONAL 2018

NUEVOS Y VIEJOS CRÍMENES ESCLARECIDOS. AVANCES EN LA CARACTERIZACIÓN DE CONTAMINANTES AMBIENTALES



¿De dónde proviene el mercurio que contamina nuestro cuerpo?

El mercurio es una potente neurotoxina que se va acumulando con los años. Un equipo internacional del que formaba parte la Instalación Europea de Radiación Sincrotrónica de Grenoble se ha dotado ahora de nuevas herramientas para determinar el origen del mercurio presente en cabello humano.

¿De dónde provenía el arsénico que en 1988 mató a cuatro personas en el Japón?

La fluorescencia de rayos X con haces generados en el laboratorio SPring-8 y la fábrica japonesa de fotones KEK sirvió para arrojar nueva luz sobre este famoso caso, en el que cuatro personas murieron envenenadas al consumir curry mezclado con arsénico. El presunto asesino ha sido condenado a muerte.



¿Cómo murió Phar Lap, el famoso caballo de carreras australiano, en 1932?



Phar Lap murió súbitamente en circunstancias sospechosas. El análisis de pelo efectuado en el sincrotrón australiano indicó en un primer momento que el animal había sido envenenado con arsénico, lo que dio lugar a titulares en el mundo entero, pero otros análisis posteriores demostraron que había muerto de un cólico.

¿Murió envenenada Agnès Sorel, la primera amante real oficial de Francia?

La ESRF ha retrocedido en el tiempo para estudiar la repentina muerte de la hermosa amante del rey Carlos VII de Francia, en el siglo XV. El análisis de su cabello pone de manifiesto niveles increíblemente elevados de mercurio.



¿Qué son las motas blancas que se observan en el famoso cuadro de Munch "El grito"?



¿Eran excrementos de pájaro? Los análisis efectuados en PETRA III, la fuente avanzada de radiación sita en Hamburgo, descartaron esa posibilidad y confirmaron que se trataba de cera de abeja, utilizada para impedir la descamación de la pintura.

Paleontología *Estudio de fósiles antiguos*



© ESRF/P. Jayet

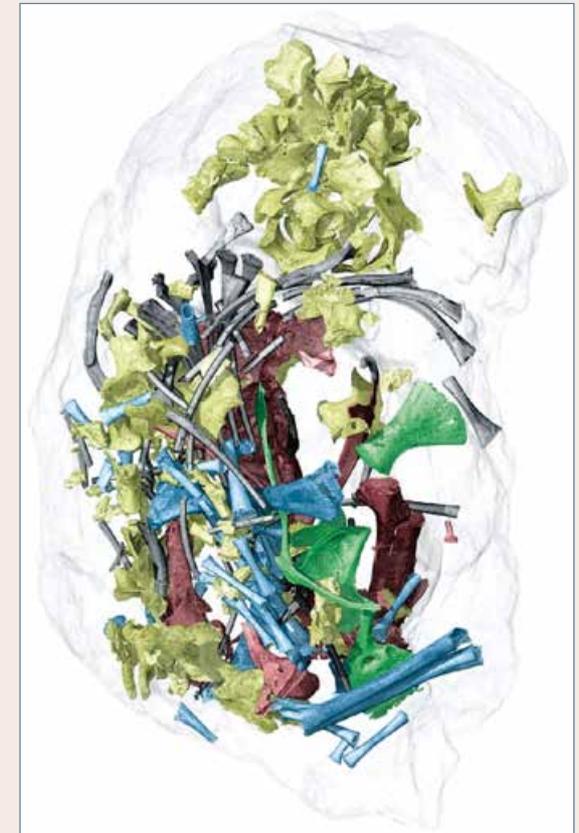
Cráneo de un dinosaurio dotado de colmillos de 200 millones de años de edad. El fósil fue escaneado por rayos X en la ESRF, con un haz 100.000 millones de veces más potente que el empleado en los hospitales. Gracias a ello, el equipo de investigación del Instituto de Estudios Evolutivos de la Universidad de Witwatersrand (Wits) de Sudáfrica pudo, por primera vez, «asomarse» al interior de un cráneo.

La ESRF cuenta con apoyo de 22 países asociados, de los que 13 son miembros y 9 asociados científicos. Sudáfrica es el más reciente afiliado a la ESRF, cuya composición no está restringida a países europeos.

Paleontología

Los paleontólogos utilizan los fósiles para estudiar la vida en la escala de tiempo geológico. Tras encontrar, observar, describir y clasificar fósiles de animales y plantas, se sirven de ellos para saber más sobre lo que fue

la Tierra en el pasado y los cambios que fue experimentando el medio con el paso del tiempo. Los fósiles nos ayudan a entender la evolución de las especies. En las fuentes avanzadas de radiación se llevan a cabo importantes investigaciones paleontológicas.

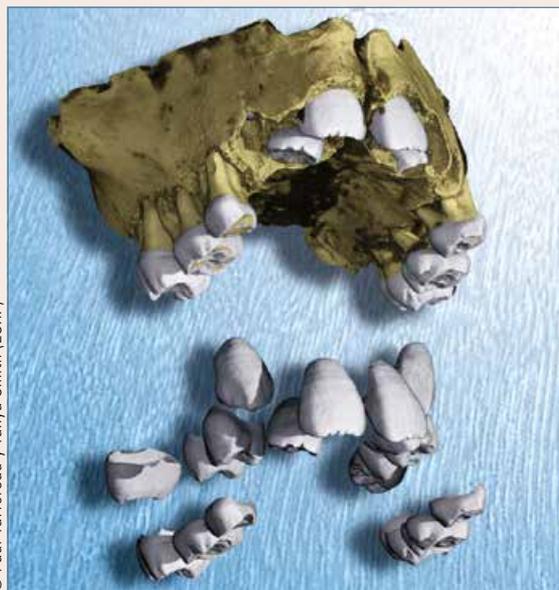


© V. Fernandez et al., PLOS ONE 10 (7): e0128610 (2014) (ESRF)

Interior de un huevo fosilizado de un centímetro de longitud. Los huevos, descubiertos en la zona nororiental de Tailandia, resultaron tener 125 millones de años de antigüedad. Gracias a las imágenes de microtomografía utilizadas para estudiar los invisibles esqueletos embrionarios que quedaron preservados en el interior, el equipo conoce ahora la verdadera identidad del animal que puso el huevo: un lagarto anguimorfo, categoría que incluye a los varanes de Komodo.

Arqueología *Estudio de material antiguo*

Reconstrucción virtual de la dentición de un niño neandertal. La histología virtual por radiación sincrotrónica aporta información muy precisa sobre el desarrollo de un individuo, que queda registrada en forma de finísimas líneas de crecimiento dentro de los dientes.



© Paul Tafforeau y Tanya Smith (ESRF)



© Adobe Stock / Fotografía de Jack Malipan

El Templo del Buda de Esmeralda, restaurado en 1831, fue redecorado con exquisitos mosaicos policromos de finos fragmentos de espejo, más parecidos a gemas naturales que a espejos de vidrio ordinarios. Lamentablemente, el arte de la decoración con espejos se perdió hace casi 150 años. Por ello se expusieron los espejos al haz del Instituto de Investigación con Radiación Sincrotrónica de Tailandia, con el objetivo último de determinar su composición química y detectar trazas de metales de transición, haciendo así posible una restauración que devolviera todo su esplendor a la obra.

Arqueología

La arqueología es el estudio de la actividad humana mediante la recuperación y el análisis de la cultura material. El registro arqueológico está formado por artefactos, estructuras arquitectónicas, ecofactos y paisajes culturales. Los arqueólogos estudian la prehistoria y la historia del ser humano, que va desde la aparición de los primeros

instrumentos líticos en Lomekwi, África oriental, hace 3,3 millones de años, hasta décadas recientes. La arqueología y la paleontología son disciplinas distintas. La primera es especialmente importante para saber más sobre las sociedades prehistóricas, que rara vez dejaron registro escrito. En las fuentes avanzadas de radiación se llevan a cabo importantes investigaciones arqueológicas.



Referencia: W. Klysubon *et al.*, "Characterization of the Ancient Decorative Mirrors from the Grand Palace Bangkok by SR-Based techniques", Trends of Synchrotron Radiation Applications in Cultural Heritage, Forensics and Materials Science, IAEA TECDOC, No. 1803, p. 86-92, 2016.

Los centros de alta tecnología alimentan a la industria

LA ESTRUCTURA microscópica y nanoscópica de un material guarda relación directa con sus propiedades macroscópicas y con su optimización para los modernos procesos de fabricación y su posterior reciclaje.

Uno de los principales usuarios de los centros de fuentes avanzadas de radiación es la industria farmacéutica, necesitada de conocer la estructura tridimensional de las proteínas y complejos proteínicos que son la diana de sus moléculas.

La herceptina, utilizada para tratar el cáncer de mama en sus estadios avanzados, es en parte el resultado de experimentos realizados en sincrotrones. Hay ahora punteras investigaciones en curso en las que se emplea radiación sincrotrónica del sector infrarrojo para dar con nuevos tratamientos contra el cáncer que puedan ser adaptados a cada paciente.



© Mark Thomas / SPL / Cosmos.



Cortesía de Hester Esna du Plessis

> Duminsani Kama prepara un microcristal que será irradiado con un potente pulso corto de láser. Lleva puesta una protección ocular especial porque trabaja dentro del «casarón» de la línea de haz ID09 de la ESRF. Tras inducir la activación fotoquímica del catalizador, se estudiará el proceso de reequilibrio por cristalografía con rayos X.



Cortesía : ESRF

< Hester Esna du Plessis en pleno experimento de difracción de rayos X de alta resolución para caracterizar catalizadores.

Repercusión de las fuentes avanzadas de radiación en la ciencia y la sociedad de los países en desarrollo

BRASIL constituye un modelo por lo que respecta a la implantación de un centro de radiación sincrotrónica en un país en desarrollo. En 1985 el país diseñó su primera fuente de radiación de sincrotrón, denominada UVX, que empezó a funcionar en 1997. Al principio fue difícil convencer a los principales interlocutores de las ventajas de contar con semejante instalación en el propio país. Cuando se abrió solo unos pocos investigadores presentaron propuestas, pero en poco tiempo el número de solicitudes había aumentado vertiginosamente. Ahora Brasil goza de reconocido prestigio internacional por la calidad de sus investigaciones, especialmente en biología estructural, y está construyendo una nueva fuente de radiación llamada Sirius.

En la República de Corea y Taiwán ha habido experiencias parecidas, que han llevado a ambos países a invertir cientos de millones de dólares en nuevas fuentes de radiación. Estos ejemplos demuestran que la existencia de centros de investigación científica de excelente calidad puede abrir un mundo de oportunidades a los medios científicos y empresariales del país. Docenas de científicos que habían partido al extranjero, advirtiendo que podían realizar investigaciones de categoría mundial en una fuente avanzada de radiación en su propio país, han regresado a casa en plena madurez profesional.

UVX >



Cortesía de LNLS/CNPEM

SIRIUS >



Cortesía de LNLS/CNPEM



SESAME, o Centro Internacional de Radiaciones de Sincrotrón para Ciencias Experimentales y Aplicadas en Oriente Medio, es una instalación de fuente avanzada de radiación sita en Allan (Jordania), cerca de Ammán, la capital, establecida bajo los auspicios de la UNESCO siguiendo muy de cerca el modelo del CERN. Este avanzado sincrotrón presta servicio a usuarios de muy diversas disciplinas como las ciencias médicas, biológicas y de los materiales, la física, la química o la arqueología.

El Centro empezó a funcionar en 2017. Sus miembros son la Autoridad Palestina, Chipre, Egipto, el Irán, Israel, Jordania, el Pakistán y Turquía.

La Unión Europea lo respalda activamente como parte de sus programas marco de investigación, con proyectos como CESSAMag* u OPEN SESAME**.



© SESAME

El OIEA ha prestado apoyo al desarrollo de **SESAME** por medio de su programa de cooperación técnica, por ejemplo impartiendo capacitación a personal y especialistas para el proyecto, o adquiriendo equipo de radiación.

SESAME combina la creación de capacidad con una labor de consolidación de la paz mediante la ciencia y constituye un proyecto modélico para otras regiones.

En él, científicos de distintos países trabajan codo a codo para hacer progresar el saber humano.

* Apoyo CERN-CE a los imanes de SESAME.

** A través de OPEN SESAME, respaldado por el programa europeo Horizonte 2020, se forma y capacita a investigadores del Oriente Medio para que puedan hacer un uso idóneo de una moderna instalación de fuente de radiación.



© SESAME

Empleo y posibilidades de carrera en las fuentes avanzadas de radiación

PARA DISEÑAR, construir, mantener, operar y utilizar esta compleja maquinaria se requiere un inmenso número de competencias en los ámbitos de la ciencia, la ingeniería, la tecnología y los procesos industriales. Hay oportunidades de carrera profesional tanto en las propias instalaciones como junto a los numerosos grupos de usuarios científicos que experimentan en ellas. Para los jóvenes técnicos, ingenieros y científicos,

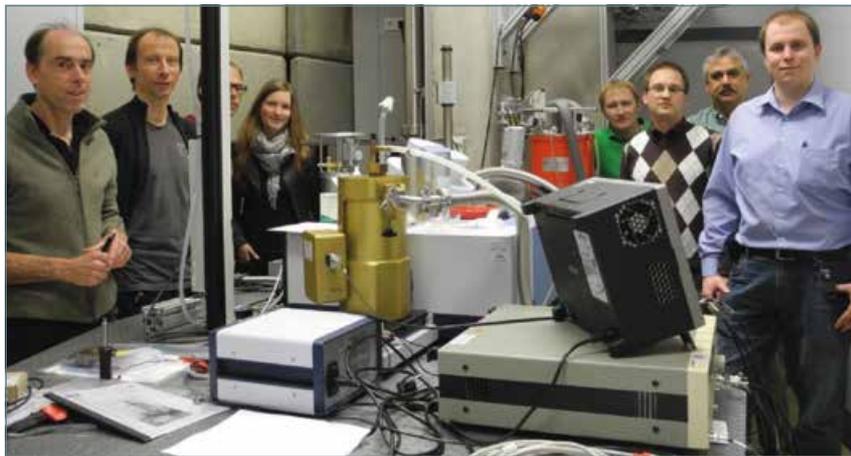
constituyen centros de aprendizaje excepcionales. Estas instalaciones atraen a investigadores de distintos grupos y muy diversas disciplinas. En ellas se forjan amistades entre investigadores de diferentes países, universidades e instituciones. La gente se conoce en la cafetería, la biblioteca, el centro informático o las presentaciones de resultados científicos. Todo ello forma parte del placer y el interés de trabajar en estos centros.

La Dra. Angela Lieverse, bioarqueóloga de la Universidad de Saskatchewan, estudia un raro cráneo de la Edad del Bronce en la fuente de radiación canadiense. >

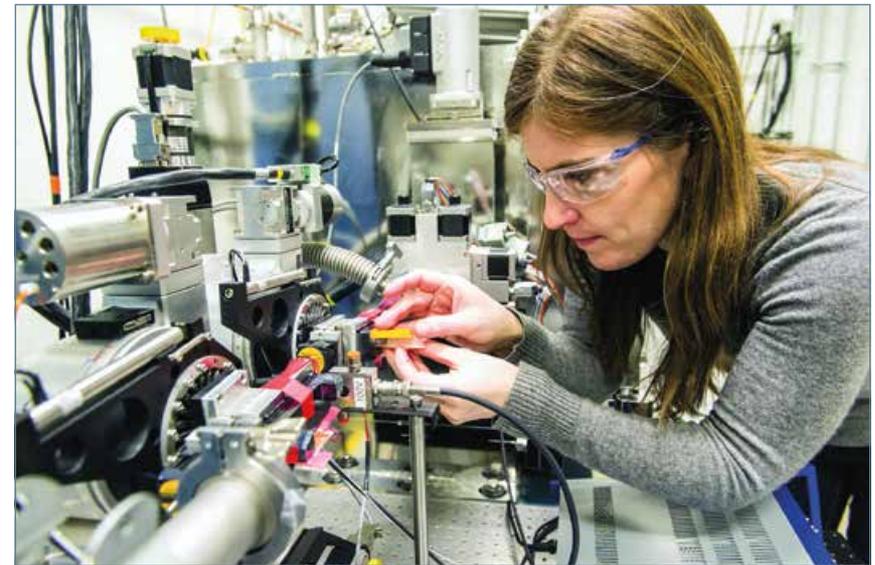


Cortesía de Canadian Light Source

Cortesía del Centro de Radiación de Sincrotrón de Dortmund



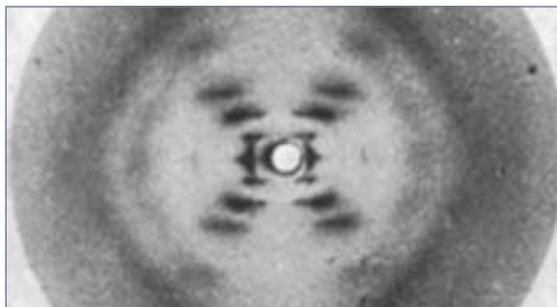
> Un grupo de científicos, técnicos e ingenieros de DELTA, la fuente avanzada de radiación de Dortmund (Alemania), instala un nuevo sistema de banda estrecha en el rango del terahercio como parte de un programa de mejora del acelerador.



Cortesía del Laboratorio Nacional de Argonne

> Mary Upton (División de Ciencias de Rayos X de la fuente avanzada de fotones del Laboratorio Nacional de Argonne) alinea un monocromador de alta resolución para preparar un experimento de dispersión inelástica resonante de rayos X.

CÍRCULOS de investigación de todo el mundo colaboran en el empeño de construir fuentes que generen radiación cada vez más intensa y permitan abordar los interrogantes más complejos que se plantean en las ciencias de la vida y de la materia condensada. Rosalind Franklin revolucionó la biología cuando empleó rayos X para describir la estructura en doble hélice del ADN. Aquello fue en 1952, y en aquel momento debió necesitar semanas para determinar ese patrón sirviéndose de tubos de rayos X convencionales. Ahora es posible hacerlo en unos pocos segundos. Para comprender y combatir problemas de salud ligados a miles de proteínas es indispensable conocer en detalle la estructura de esas moléculas proteínicas. Esta es la principal función que cumplen las fuentes de radiación, utilizadas hoy para el estudio de los virus. Muchas veces los problemas e interrogantes biomédicos, ambientales o relativos a la herencia humana revisten dimensión local, y este es el motivo por el que hacen falta tantas fuentes de radiación. Aunque en el mundo hay más de 50, que generan cientos de líneas de haz, los grupos de usuarios que necesitan una fuente de radiación para hacer investigación básica, aplicada o industrial se han multiplicado con mayor rapidez. De ahí que a menudo haya listas de espera de meses, o incluso años, para acceder a una fuente, y de ahí la imperiosa necesidad de más fuentes de radiación, sobre todo en los países en desarrollo.



< Patrón de difracción de rayos X obtenido por Rosalind Franklin en 1952.

Futuro

Estas nuevas iniciativas conocerán dificultades. Pero comparten con SESAME los objetivos de crear capacidad regional y promover el entendimiento, la amistad y la paz, reuniendo a científicos de distintos países y orígenes étnicos para hacer ciencia de categoría mundial.

Sekazi K. MTINGWA
y Herman WINICK,
“SESAME and beyond,”
Editorial,
Science Magazine,
20 de mayo de 2017



Laboratorio MAX IV, sincrotrón nacional sueco, inaugurado en 2016.



Fuente de Fotones de Alta Energía (HEPS) que se va a construir en China.

Cortesía de Roger Erikson

Imagen cedida por el prof. Qing Qin y el Dr. Zhe Duan

Fuentes de Luz Avanzadas y Cristalografía

Herramientas para el Descubrimiento y la Innovación



Publicado por **LAAAMP** (Lightsources for **A**frica, **A**sia, the **A**mericas and **M**iddle East **P**roject), an International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) and International Union of Crystallography (IUCr) project funded by the International Science Council (ISC)

Más información sobre el LAAAMP

<http://laaamp.iucr.org>



APOYO ADICIONAL DE



El OIEA es el centro mundial para la cooperación en el ámbito nuclear y trata de promover el uso de la tecnología nuclear con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física.



OPEN SESAME está respaldado por el programa Horizonte 2020, Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea, en virtud del Acuerdo de Subvención n° 730943.

Redacción: Ernest Malamud, Fermilab y Universidad de Nevada, Reno.

El redactor expresa su agradecimiento a las numerosas personas que han contribuido a la preparación de este folleto, relacionadas en: <http://laamp.iucr.org/tasks/brochure>.



Maquetación: Atelier Christian Millet, Paris

Primera impresión: diciembre de 2017. Segunda impresión: julio de 2018.

Revisado: marzo 2019.