

# Estructura y aplicaciones de un sincrotrón

♦ Alejandro Fuentes-Penna  
Jorge A. Ruiz-Vanoye  
Ocotlán Díaz-Parra



Un sincrotrón es un acelerador de partículas, principalmente electrones, destinado a observar estructuras moleculares como si fuera un gran microscopio. El sincrotrón pertenece al grupo de aceleradores de partículas, por ejemplo, los viejos televisores, hornos de microondas, el acelerador de hadrones y las máquinas de rayos X.

En 1952 se fundó en Europa el laboratorio del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN, por sus siglas en francés) con recursos destinados por la UNESCO y doce países europeos. En 1955 se inició la construcción del sincrotrón de protones de 600 megaelectronvoltios (MeV) —unidad de energía que representa la variación de energía potencial de un electrón al moverse—, y posteriormente, la del sincrotrón de protones de 20 GeV, el cual realizó la aceleración de los primeros haces de luz el 1 de agosto de 1957 y del primer haz de protones el 24 de noviembre de 1959.<sup>1</sup>

En el año 2000 había en Europa catorce fuentes sincrotrón y dos proyectos en construcción. Para 2009 estaban previstas veinte fuentes de luz sincrotrón y en 2014 se estimaron en el mundo cincuenta sincrotrones repartidos en Asia, América, Europa y Oceanía.<sup>2</sup>

## Radiación

La radiación sincrotrón o luz sincrotrón es un tipo de luz que se emite por partículas —electrones o protones— que viajan a 300 000 km/s, con alta energía girando en un anillo de contención. Esta luz permite a investigadores observar fenómenos de la naturaleza, del cuerpo humano o de cualquier objeto de una manera extremadamente precisa.<sup>3</sup> La radiación sincrotrón producida tiene una trayectoria curvilínea y abarca un espectro de longitudes de onda entre infrarrojo y rayos X.<sup>4</sup>

El sincrotrón Alba, localizado en Barcelona, España, pertenece a la tercera generación de sincro-

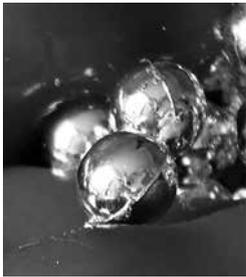
<sup>1</sup> Manuel Aguilar y Francisco J. Ynduráin, "El CERN y la física de altas energías en España", *Revista Española de Física*, vol. 17, núm. 3, mayo-junio, 2003.

<sup>2</sup> *La luz del sincrotrón*, dossier educativo para estudiantes de bachillerato y ESO, FECYT/Gobierno de España-Ministerio de Economía y Competitividad, Madrid, 2014, <https://goo.gl/WDaRI2>, consultado en marzo de 2016.

<sup>3</sup> Berenice Zepeda y Carlos Brito, "¿Qué es un acelerador de partículas fuente de luz sincrotrón?", en Fuente de luz sincrotrón, un proyecto para México, CINEVESTAV, 2010, <https://goo.gl/4cLOmK>, consultado en marzo de 2016.

<sup>4</sup> Fernando Ania y Francisco José Baltá-Calleja, "Fluctuaciones de densidad como precursoras de cristalización en polímeros mediante dispersión de rayos X en tiempo real utilizando radiación sincrotrón", *Revista Española de Física*, vol. 17, núm. 2, marzo-abril de 2003, pp. 40-42, <https://goo.gl/gIcm3x>, consultado en marzo de 2017; "Electromagnetic spectrum", en Berkeley Lab, <https://goo.gl/v6R78J>, consultado en marzo de 2017.

♦ Profesores e investigadores, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH)  
En la elaboración de este artículo participó Fernando Romero-Torres, profesor e investigador, Facultad de Contaduría, Administración e Informática (FCAEI), UAEM



trones. Con una estabilidad térmica con variaciones que no superan los  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tiene una capacidad de treinta líneas de luz, del tamaño de un cabello humano, independientes para experimentación. Las características de cada línea dependen tanto de las características de la fuente (diferentes tipos de imán) como de la óptica (la forma en que enfoca los haces de luz). Por otra parte, la luz de este sincrotrón está polarizada, lo cual quiere decir que todos los vectores del campo eléctrico están alineados en la misma dirección (por ejemplo, polarización lineal de tipo horizontal, vertical o circular).<sup>5</sup>

### Estructura

La luz sincrotrón (LS) permite observar con precisión estructuras, a nivel molecular y con una excelente resolución, para conocer sus características internas. Los electrones viajan en un anillo de almacenamiento durante un tiempo definido por el investigador. La LS se produce en los puntos del anillo en los que un campo magnético curva la trayectoria de los electrones (líneas de luz). El proceso del sincrotrón se puede resumir de la siguiente manera:

1. Un cañón de electrones se calienta a  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$  para expulsar electrones acelerándolos a  $100\text{ MeV}$ , a través de campos eléctricos, en un acelerador lineal denominado LINAC (*linear accelerator*).

2. Los electrones son acelerados en el anillo propulsor con campos magnéticos veinte mil ve-

ces más potentes que el campo magnético de la Tierra hasta llegar a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

3. Los electrones acelerados se inyectan en el anillo de almacenamiento usando campos magnéticos. En esta etapa, los electrones se mantienen circulando en ese anillo, que tiene una presión parecida a la del espacio exterior. Si los electrones se mantienen por mucho tiempo en esta etapa chocarán contra las paredes o entre ellos y tendrán pérdidas; pero para evitar esta pérdida se realiza una reinyección de electrones. Por otra parte, los electrones que pierden energía emiten luz (luz de sincrotrón).

4. Los campos magnéticos hacen que los electrones acelerados giren y produzcan la luz de sincrotrón, que se ve como si fueran líneas de luz. Por este motivo, los campos magnéticos obligan a los electrones a seguir una trayectoria de zigzag.

5. En este paso se debe seleccionar la longitud de onda que interesa para cada experimento.

6. La luz de sincrotrón ilumina la muestra que se debe analizar. Un detector recoge la imagen producida debido a la interacción luz-muestra. Los rayos X son el tipo de luz más utilizado para interactuar con los átomos.

7. La imagen proyectada es escaneada, almacenada y analizada en un equipo de cómputo. Durante el proceso de interacción de la luz con la materia ésta refleja, dispersa, absorbe o reemite dicha luz.

---

<sup>5</sup> Pascual Bolufer-Mayans, "El sincrotrón Alba", *Dyna. Ingeniería e Industria*, vol. 84, núm. 6, septiembre de 2009, pp. 481-484, <https://goo.gl/pCR0G2>, consultado en marzo de 2017.

## Investigaciones

Las investigaciones mediante la espectrometría de rayos X se han ampliado a diferentes disciplinas de la ciencia, por lo cual es ésta una herramienta utilizada principalmente en el análisis de muestras biológicas, en el que se han estudiado elementos como bronce (Br), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), estroncio (Sr) y cinc (Zn).<sup>6</sup>

También se ha utilizado para el análisis cuantitativo de Zn y carbono (Ca) en cáncer de próstata y en tejidos normales por microanálisis con radiación de sincrotrón, para comprender las diferencias en densidad y en los niveles de concentración de Zn.<sup>7</sup>

Igualmente se han hecho distribuciones de cromo (Cr) mapeadas en órganos reproductivos de ratones, después de exponerlos a CrCl<sub>3</sub> usando análisis por microsonda de protones y por radiación de sincrotrón.<sup>8</sup>

Gonchar y colaboradores realizaron un proyecto de investigación en el que expusieron los resultados de estudios en el cuero cabelludo de pacientes con patología oncológica mamaria, donde

identificaron un decrecimiento significativo en las concentraciones de selenio (Se), Zn y Cr.<sup>9</sup>

Harada y colaboradores han expuesto el interés en la influencia de materiales magnéticos sobre ciertos órganos en peces y aves para identificar sensores geomagnéticos, de los cuales el cerebro —que contiene partículas magnéticas sensibles a campos magnéticos— puede procesar información de navegación.<sup>10</sup>

Martín y colaboradores aplicaron SR-FRX y SIMS al análisis de anillos de árboles de pino rojo de un área dañada por lluvia ácida y polución, los cuales fueron subsanados con limo.<sup>11</sup>

Manchado Macías y colaboradores han empleado el sincrotrón en el estudio cristalquímico de la alunita que aparece en tamaños micrométricos diseminada entre esmectitas, a través del uso de microdifracción para comprobar la existencia de cristales con una mezcla de minerales puros o si contienen disolución sólida de los distintos términos.<sup>12</sup>

Vizcaíno y colaboradores han realizado experimentación en el Laboratorio Nacional de

<sup>6</sup> M. L. Carvalho, C. Casaca, J. P. Marques, T. Pinheiro y A. S. Cunha, "Human teeth elemental profiles measured by synchrotron X-ray fluorescence: dietary habits and environmental influence", *X-Ray Spectrometry*, vol. 30, núm. 3, pp. 190-193.

<sup>7</sup> A. Ide-Ektessabi, S. Fujisawa, K. Sugimura, Y. Kitamura y A. Gotoh, "Quantitative analysis of zinc in prostate cancer tissues using synchrotron radiation microbeams", *X-Ray Spectrometry*, vol. 31, núm. 1, 2002, pp. 7-11.

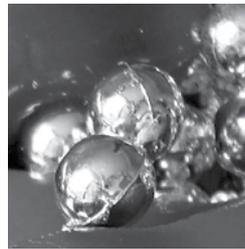
<sup>8</sup> R. Ortega, G. Devès, M. Bonnin-Mosbah, M. Salome, J. Susini, L. M. Anderson y K. S. Kasprzak, "Chromium mapping in male mice reproductive glands exposed to CrCl<sub>3</sub> using proton and X-ray synchrotron radiation microbeams", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, secc. B, vol. 181, núms. 1-4, 2001, pp. 485-488.

<sup>9</sup> A. Gonchar, Y. Kolmogorov, A. Dikalova, V. Yelinova y V. Kondratev, "Analysis of trace elements responsible for antioxidant protection by SRFXA method", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, secc. A, vol. 470, núms. 1-2, 2001, pp. 405-408.

<sup>10</sup> Y. Harada, M. Taniguchi, H. Namatame y A. Iida, "Magnetic materials in otoliths of bird and fish lagena and their function", *Acta Oto-Laryngologica*, vol. 121, núm. 5, 2001, pp. 590-595.

<sup>11</sup> R. R. Martin, T. K. Sham, G. W. Won, K. W. Jones y H. Feng, "Synchrotron X-ray fluorescence and secondary ion mass spectrometry in tree ring microanalysis: applications to dendroanalysis", *X-Ray Spectrometry*, vol. 30, núm. 5, 2001, pp. 338-341.

<sup>12</sup> Eva Manchado Macías, Manuel Sánchez del Río, Emilia García Romero y Mercedes Suárez Barrios, "Microdifracción con radiación sincrotrón en minerales del grupo de la alunita del yacimiento de arcillas especiales de Tamame de Sayago (Zamora)", *MACLA*, vol. 11, 2009.



Luz Sincrotrón (LNLS), con el objetivo de obtener diagramas de difracción de rayos x de muestras de Zircaloy-4 irradiado con neutrones. Los autores concluyen que los diagramas de difracción de rayos x realizados con luz sincrotrón de gran intensidad permiten observar los picos más intensos de la fase hidruro en muestras con concentraciones del 0.2%at, y han detectado que la evolución del ancho y altura de los picos  $\langle 111 \rangle \delta$  y  $\langle 200 \rangle \delta$  con los tratamientos térmicos indica que la radiación neutrónica también afecta la estructura cristalina de los hidruros. Asimismo, han identificado que el efecto relevante para este trabajo es el incremento del área de estos picos con los recocidos a 600 °C, considerando que si los tratamientos están a 400 °C éste no genera cambios significativos.<sup>13</sup>

Lamas y colaboradores estudiaron la estructura cristalina de soluciones sólidas nanoestructuradas homogéneas en composición de ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> y ZrO<sub>2</sub>-CaO, sintetizadas por el método de gelificación-combustión, mediante difracción de

rayos x con radiación de sincrotrón (LNLS-Brasil). Para este estudio, los autores emplearon la radiación de sincrotrón para distinguir las fases tetragonal y cúbica mediante el seguimiento de líneas muy débiles de la fase tetragonal relacionadas con el desplazamiento de los aniones O<sub>2</sub> para determinar el límite en composición entre ambas fases.<sup>14</sup>

En el artículo de Feugeas y colaboradores se presentan los resultados del estudio de la estabilidad de la austenita expandida después de tres años de estacionamiento a temperatura ambiente, llegando a la conclusión de que la composición superficial estudiada por rayos x no sufrió cambios en el tiempo de estacionamiento.<sup>15</sup>

La disolución de metales es un tema concurrente por los investigadores en el proceso de pasivación de aleaciones Fe-Cr, donde se han realizado mediciones *in situ* como función de la composición de la aleación.<sup>16</sup>

Se han hecho estudios sobre la distribución elemental y composicional de partículas emitidas por los gases de combustión de automóviles.<sup>17</sup>

---

<sup>13</sup> P. Vizcaino, A. D. Banchik y J. P. Abriata, "Exploración de la fase hidruro en zircaloy-4 irradiado utilizando luz sincrotrón", Congreso CONAMET/SAM 2004.

<sup>14</sup> D. G. Lamas, R. O. Fuentes, I. O. Fábregas, G. E. Lascalea, M. E. Rapp, J. R. Casanova, N. E. Walsöe de Reca, A. F. Craievich y M. C. A. Fantini, "Estudio de la estructura cristalina de soluciones sólidas nanoestructuradas de ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> y ZrO<sub>2</sub>-CaO por difracción de rayos x con radiación de sincrotrón", Congreso CONAMET/SAM 2004.

<sup>15</sup> J. Feugeas, L. Nosei, M. Avalos, B. Gómez, L. Nachez, J. Ferrón y A. Craievich, "Estudio de estabilidad y microdureza de la austenita expandida en acero DIN WNr.1 4882 nitrurado iónicamente", Jornadas SAM/CONAMET/Simposio Materia 2003.

<sup>16</sup> Alison J. Davenport, Mary P. Ryan, Michael C. Simmonds, Petra Ernst, Roger C. Newman, Stephen R. Sutton y John S. Colligon, "In situ synchrotron x-ray microprobe studies of passivation thresholds in Fe-Cr alloys", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 148, núm. 6, 2001, pp. B217-B221.

<sup>17</sup> N. Molders, P. J. Schilling, J. Wong, J. W. Roos y I. L. Smith, "X-ray fluorescence mapping and micro-XANES spectroscopic characterization of exhaust particulates emitted from auto engines burning MMT-added gasoline", *Environmental Science & Technology*, vol. 35, núm. 15, 2001, pp. 3122-3129.

Para la elaboración y manufactura de celdas solares, se ha empleado esta técnica para determinar cuáles son las impurezas de los precipitados metálicos en escala nanométrica sobre superficies a base de silicio policristalino, siendo dichas impurezas las que afectan el *performance* de las celdas.<sup>18</sup>

En cuestiones ambientales, se han hecho estudios relacionados con desperdicios sólidos volátiles.<sup>19</sup>

Actualmente se tienen múltiples aplicaciones para el uso de la luz de sincrotrón considerando sus características específicas en la emisión de haces de luz de diferentes frecuencias, pero muchas más aparecerán en el futuro.

### **Ventajas del sincrotrón**

La luz del sincrotrón es una herramienta para el análisis y experimentación cuyos resultados se pueden emplear en diferentes disciplinas. Una gran ventaja es el rango que cubre la luz del sincrotrón, ya que se puede emplear desde el infrarrojo

hasta los rayos x. A continuación se enlistan unas características del sincrotrón que pueden considerarse benéficas para el desarrollo de proyectos:

1. Brillo: una de las características principales del sincrotrón es la emisión de luz. El brillo es una medida del flujo de fotones emitidos por unidad de área y unidad de ángulo sólido en un intervalo de longitudes de onda. Con el aumento del brillo se incrementa la intensidad de la luz y obtenemos más fotones por unidad de tiempo; con el aumento de brillo del sincrotrón se incrementa la precisión de la medida, debido a la velocidad de los electrones cercana a la luz. Por lo tanto, las ecuaciones que rigen su movimiento son las de la relatividad.

2. Rango alto de longitudes de onda.

3. Polarización: la luz del sincrotrón puede polarizarse en diferentes direcciones.

4. Pulsos de luz: los impulsos luminosos hacen que las fuentes de luz sincrotrón sean muy adecuadas para el estudio de fenómenos de corta duración.<sup>20</sup>

<sup>18</sup> Scott A. McHugo, A. C. Thompson, A. Mohammed, G. Lamble, I. Perichaud, S. Martinuzzi, M. Werner, M. Rinio, W. Koch, H. U. Hoefs y C. Haessler, "Nanometer-scale metal precipitates in multicrystalline silicon solar cells", *Journal of Applied Physics*, vol. 89, núm. 8, 2001, pp. 4282-4288.

<sup>19</sup> Maria Caterina Camerani, Andrea Somogyi, Mikael Drakopoulos y Britt-Marie Steenari, "Synchrotron radiation induced M-X-RAY fluorescences spectroscopy on municipal solid waste fly ashes", *Spectrochimica Acta, Part B*, 2001, vol. 56, núm. 8, 2001, pp. 1355-1365.

<sup>20</sup> *La luz del sincrotrón, op. cit.*