

## Compuestos de intercalación. Ejemplos y aplicaciones

Probablemente muchos de nosotros no hayamos oído hablar nunca del término “compuestos de intercalación”. Sin embargo, nos estamos encontrando con ellos en numerosas aplicaciones de la vida cotidiana, aún sin saberlo. Así, quizás no nos hemos parado a pensar que esa especie de “serrín” que se utiliza en las camas de gatos para adsorber la orina, se trata en realidad de una sepiolita (mineral de arcilla de tipo laminar con aspecto fibroso) y que en el momento de adsorber la urea en el interior de sus canales se está produciendo la formación de un compuesto de intercalación.

Los compuestos de intercalación se forman a partir de la inserción, más o menos reversible (no en todos los casos es posible invertir totalmente el proceso), de una especie “huésped” (del término inglés *guest*), que pueden ser átomos, iones o moléculas, en una red cristalina sólida, que recibe el nombre de matriz anfitriona (*host*). La red conserva su integridad estructural en el curso de la intercalación y desintercalación, es decir, se trata de un proceso topotáctico. Estas reacciones ocurren a temperaturas próximas a la ambiente, lo que contrasta con la mayoría de las rutas de síntesis en estado sólido, que se producen a

temperaturas generalmente muy altas.

Son varios los criterios que se pueden aplicar a la hora de clasificar los tipos de redes sólidas (o matrices anfitrionas) que pueden sufrir reacciones de intercalación. Así, atendiendo a su dimensionalidad, los tipos de redes se pueden clasificar en estructuras tridimensionales (3-D), bidimensionales o laminares (2-D), cadenas lineales (1-D) y redes moleculares (cerodimensionales ó 0-D). Por otra parte, según su comportamiento eléctrico, podemos distinguir entre redes aislantes y redes con conductividad eléctrica. En las primeras, la concentración de las especies iónicas huéspedes viene fijada por la composición química y permanece sin cambiar durante la reacción. Por el contrario, las redes conductoras presentan la característica de que la concentración de especies huéspedes puede alterarse por oxidación o reducción de la red. En cualquiera de los casos, la intercalación es un proceso complejo que implica varias etapas: adsorción del agente intercalante (*huésped*) sobre los cristales de la red, intercambio o inserción en la superficie de la red, formación de estadios intermedios en el caso de los compuestos laminares (como veremos a continua-

ción), y, por último, transporte dentro de la estructura de la red.

Sin lugar a dudas, las reacciones de intercalación más estudiadas son aquellas que ocurren en redes con estructura tipo laminar. En estos compuestos la intercalación ocurre mediante el mecanismo conocido por *staging* (estadios), que implica la formación de compuestos con secuencias alternas de sitios interlaminares vacíos y llenos (ver Figura 1). El grado o número de *staging* nos indica el número de cada cuántas láminas de la red se intercalan las especies huéspedes. Es decir, un compuesto de intercalación con *staging* 2 significa que cada 2 láminas de la red anfitriona se intercala una de especies huéspedes (o sea, 2 láminas de red, 1 de huésped, 2 de red, 1 de huésped, y así sucesivamente). Se crea así una especie de andamiaje, que es, además, favorable desde el punto de vista energético. El grafito (forma alotrópica del carbono) es uno de los ejemplos más representativos de estructura laminar que puede dar lugar a la formación de compuestos de intercalación (principalmente de potasio) que presentan distinto grado de *staging*, dependiendo de las condiciones de intercalación.

Los compuestos que se forman por reacciones de intercalación son insolubles, por lo que no pueden ser purificados o separados por técnicas como recristalización, cromatografía, etc. Es por ello que, cuando se diseña una estrategia de

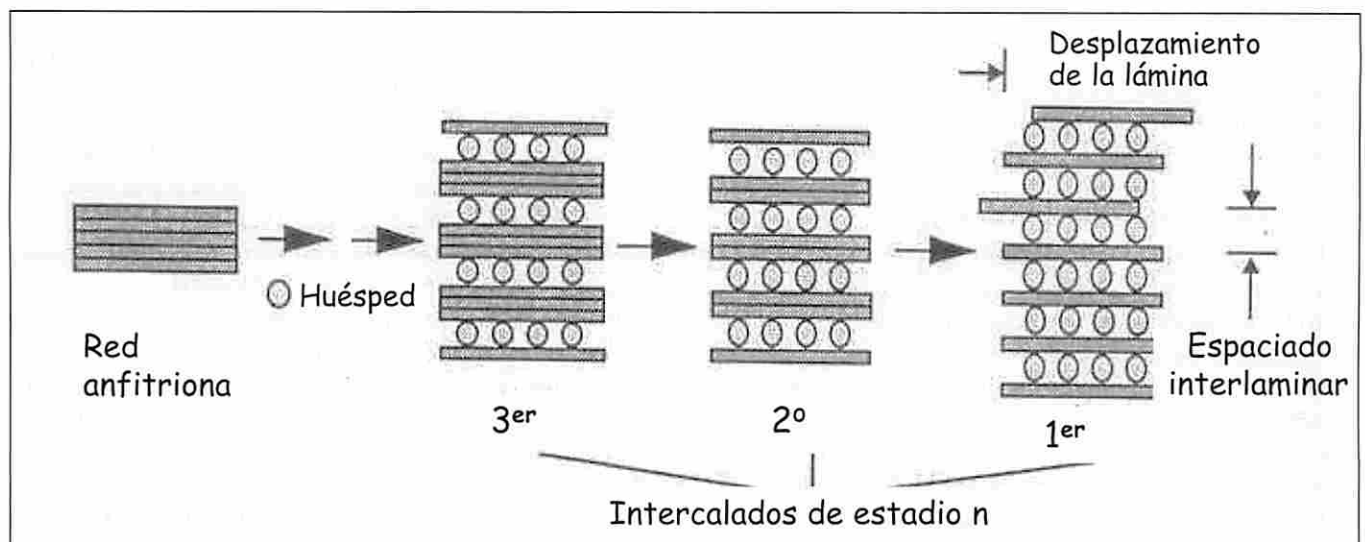


Figura 1. Mecanismo de *staging* en la formación de compuestos de intercalación en estructuras laminares.

síntesis es extremadamente importante que las reacciones sean limpias y los productos de reacción estén libres de impurezas. Sin entrar en detalle, diremos que son varios los métodos que se pueden utilizar para sintetizar un compuesto de intercalación: 1) reacción directa; 2) intercambio iónico; 3) hinchamiento, floculación y refloculación; 4) electrointercalación. Además de ellos, existen

otros métodos que sirven para aumentar la velocidad de la reacción de intercalación, como puede ser la activación por Ultrasonidos o por Microondas.

A continuación veremos distintos tipos de materiales que pueden llevar a cabo reacciones de intercalación (en la tabla 1 se presentan ejemplos de redes y especies que pueden formar compuestos de intercalación).

## ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES

Un ejemplo típico y numeroso de red tridimensional es el de las **zeolitas**. Recordemos que las zeolitas son aluminosilicatos (naturales o sintéticos) formados por tetraedros de  $AlO_4$  y  $SiO_4$  que se unen compartiendo oxígenos de los vértices, dando lugar a estructuras abiertas que dejan canales en su interior.

Tabla 1.

Algunos ejemplos de compuestos de intercalación. Entre paréntesis se indican las especies que se pueden intercalar.

Redes aislantes	Redes conductoras
<p><b>Tridimensionales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zeotipos (cationes y especies moleculares)</li> <li>- <math>\beta</math>-alúmina sódica (cationes monovalentes y cationes moleculares)</li> </ul>	<p><b>Tridimensionales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Canales que se cruzan: fases de Chevrel (metales alcalinos, metales de transición: Fe, Co, Ni, Zn, Cd, Cu, Ag)</li> <li>- Canales unidimensionales aislados:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• tipo rutilo (<math>Li^+</math>)</li> <li>• tipo bronce <math>A_xWO_3</math> y <math>H_xWO_3</math> (alcalinos, protones)</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Laminares</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Silicatos (moléculas neutras: agua, amoníaco, ésteres; cationes orgánicos e inorgánicos, cadenas de N-alquil amonio)</li> <li>- Hidróxidos dobles laminares: aniones orgánicos e inorgánicos, polímeros)</li> <li>- Titanatos y niobatos de metales alcalinos (bases de Brönsted)</li> <li>- Fosfatos ácidos tetravalentes (<math>Na^+</math>, amoníaco, di-aminas, n-alquilaminas)</li> </ul>	<p><b>Laminares</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dicalcogenuros de metales de transición (metales alcalinos, agua, moléculas orgánicas: bases de Lewis, heterociclos, fosfinas; compuestos de coordinación y organometálicos)</li> <li>- Trisulfuros de fósforo metálicos (<math>Li^+</math>, <math>K^+</math>, <math>NH_4^+</math>, aminas, cobaltoceno)</li> <li>- Oxihaluros de metales de transición: <math>FeOCl</math> (piridinas, anilinas, metalocenos, compuestos dadores de electrones)</li> <li>- Óxidos metálicos               <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>MoO_3</math> (<math>H_2</math>, organometálicos)</li> <li>• <math>V_2O_5</math> (cationes pequeños, <math>H_2</math>)</li> <li>• geles de <math>V_2O_5</math> (sales de amonio, cationes orgánicos, polímeros)</li> </ul> </li> <li>- Grafito               <ul style="list-style-type: none"> <li>• con reducción de las láminas (alcalinos)</li> <li>• con oxidación de las láminas (ácidos inorgánicos, halógenos, haluros de metal y gases nobles, óxidos y oxohaluros metálicos y no-metálicos)</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>En cadena</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Polifosfatos <math>KPO_3</math> y <math>NaPO_3</math> (cationes de n-alquil y n-dialquil-amonio, aldehidos, ácidos carboxílicos)</li> </ul>	<p><b>En cadena</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tricalcogenuros de metales de transición (<math>Li^+</math>)</li> </ul>

Estos canales pueden albergar en su interior cationes mono y divalentes, así como moléculas de agua. Estas especies son altamente móviles a temperatura ambiente y pueden intercambiarse con otras especies iónicas o moleculares (formando así el compuesto de intercalación), dando lugar a nuevas estructuras que ven su diámetro de poro (o tamaño de canal) modificado. De este modo, las zeolitas pueden actuar como tamices moleculares, es decir, dejan pasar unas especies a su través (aquellas que caben por el canal formado) y excluyen otras. Esta propiedad las hace ser altamente aplicables en el campo de la catálisis, especialmente como catalizadores con selectividad de forma. Así, por ejemplo, la intercalación de cationes moleculares como el  $\text{NH}_4^+$ , seguida de la calcinación (es decir, calentamiento en aire a altas temperaturas) para eliminar el amoníaco, genera la zeolita ácida, de gran aplicación en el craqueo (ruptura) de hidrocarburos pesados para producir gasolina y diesel.

## ESTRUCTURAS LAMINARES

Otro ejemplo de red, esta vez con estructura de tipo laminar (es decir, bidimensional), que puede llevar a cabo reacciones de intercalación es el de algunos **silicatos laminares** o minerales de la arcilla. Podemos distinguir entre los silicatos laminares 1:1 (también llamados T-O, donde una lámina está formada por una capa de tetraedros y una de octaedros) y los 2:1 (T-O-T, en los que cada lámina está formada por dos capas de tetraedros con una de octaedros en medio). La capa tetraédrica está formada generalmente por tetraedros  $\text{SiO}_4$  y la octaédrica por octaedros  $\text{AlO}_6$  y  $\text{MgO}_6$ , aunque se puede producir la sustitución por otros cationes en las láminas. Las láminas de los silicatos 2:1 (esmectitas) se encuentran cargadas negativamente, por lo que pueden insertar o intercalar ciertos cationes en el espacio interlaminar, los cuales, a su vez, pueden ser intercambiados por otros.

Un término muy relacionado con la intercalación en arcillas es el de las **arcillas pilareadas** o *pillared clays*. Las reacciones de pilareamiento consisten en introducir entre las láminas de arcilla (silicato) ciertos tipos de policationes voluminosos, que por calentamiento posterior, se consolidan como óxidos metálicos, que quedan anclados a modo de pilares (de ahí su nombre) entre las láminas de arcilla, proporcionándole una gran microporosidad a la misma (lo que interesa desde el punto de vista catalítico).

Otro campo de creciente interés es el de los **nanocompuestos polímero-arcilla**, formados por la intercalación de arcillas minerales laminares con materiales poliméricos. Estos composites organo-inorgánicos presentan alta resistencia mecánica, gran estabilidad térmica, mayor facilidad de procesamiento y mejores propiedades dieléctricas que sus componentes por separado. Un ejemplo es el del composite arcilla-nylon 6, preparado por investigadores de la TOYOTA, que presenta propiedades mecánicas, térmicas y reológicas excelentes.

Al contrario que las láminas de esmectitas (cargadas negativamente), las de los **hidróxidos dobles laminares** (otro tipo de red laminar que puede sufrir intercalación) se encuentran cargadas positivamente. Los hidróxidos dobles laminares son una clase de compuestos que se derivan de la sustitución parcial de un catión divalente por uno trivalente en un hidróxido con estructura tipo brucita. El mineral natural, la hidrotalcita, es el mejor ejemplo conocido. La sustitución catiónica da lugar a un exceso de carga positiva, que es compensado por la presencia de aniones (como carbonato o nitrato) en la interlámina. Estos compuestos tipo hidrotalcitas pueden intercalar aniones de tipo orgánico, o polímeros (acrilato, polivinilacetato) entre otras especies. Las hidrotalcitas presentan interés como intercambiadores aniónicos, catalizadores básicos y precursores catalíticos. Pero además, recientemente se ha reportado la síntesis de un nanohíbrido (compuesto

con alguna de sus dimensiones a escala nanométrica) formado por la intercalación de biomoléculas (ADN y oligonucleóticos) en una hidrotalcita. Este compuesto puede ser utilizado en terapia génica, actuando como portador de genes y medicamentos. Se ha demostrado que es capaz de penetrar en las células ejerciendo su actividad como agente antitumoral, en concreto, en la destrucción de las células de leucemia.

Otro ejemplo de intercalación en compuestos laminares es el de los llamados **bronces de hidrógeno**, que se forman por intercalación de hidrógeno en el óxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ). Sirven, por tanto, para almacenar el hidrógeno, pudiendo ser de diferente color, según el grado de intercalación: azul I, azul II, rojo y verde.

El **grafito** es un tipo de red laminar, conductora, que puede exhibir un comportamiento redox bifuncional. Así, puede reducirse, dando lugar a la formación de láminas macroaniónicas, u oxidarse, formando láminas macrocatiónicas. El primer caso incluye la intercalación de metales alcalinos, alcalino-térreos, y tierras raras, y los derivados moleculares con cationes moleculares o solvatados. En el segundo caso, pueden intercalarse ácidos, halógenos, óxidos y haluros metálicos.

## APLICACIONES DE LOS COMPUESTOS DE INTERCALACIÓN

Las aplicaciones de los compuestos de intercalación se encuentran en diferentes campos, que varían desde la adsorción y la catálisis hasta el de los dispositivos electroquímicos.

En el campo de la **adsorción**, la capacidad de algunos sólidos de intercalar moléculas neutras resulta muy útil para ciertos procesos tecnológicos. Como hemos comentado antes, el grupo más importante es el de las zeolitas, que presentan adsorción con selectividad de forma y propiedades de tamices moleculares; así, encuentran aplicación en procesos de secado, en la separación y

purificación de gases o líquidos o en la separación de isómeros. Los minerales de la arcilla también pueden ser utilizados como adsorbentes selectivos. La capacidad de cambio iónico de las zeolitas y de otros sólidos inorgánicos es aplicable, además, en la eliminación de isótopos radiactivos de materiales residuales nucleares, en los cuales no pueden usarse intercambiadores orgánicos, debido a su sensibilidad a la alta intensidad de radiación. Las zeolitas también pueden ser utilizadas para el **almacenamiento** de una amplia variedad de productos químicamente activos, que luego pueden ser eliminados por reacciones de desplazamiento o por calentamiento. De modo análogo, el hidrógeno puede almacenarse reversiblemente en los bronceos de hidrógeno; también se han descrito compuestos de intercalación metal-grafito que sirven para almacenar y separar los isótopos del hidrógeno.

En el campo de la **catálisis**, los compuestos de intercalación muestran interesantes aplicaciones. Por ejemplo, mientras que las reacciones clásicas de catálisis heterogénea están confinadas a la interfase gas-sólido o líquido-sólido, en el caso de los catalizadores de intercalación con estructuras de esqueleto abierto o estructuras laminares, es toda la masa del sólido (*bulk*) la que puede participar. El sustrato se puede difundir dentro del espacio intracristalino del sólido, que presenta un entorno químico diferente al de la superficie, lo que puede dar lugar a estados de transición intermedios con energías de activación más bajas. Esto se traduce en un aumento de la selectividad hacia un determinado producto e incluso en la formación de compuestos diferentes. De hecho, hay reacciones que transcurren de diferente manera en función de que se lleve a cabo dentro del espaciado interlaminar o fuera del mismo (ver Figura 2). Por otra parte, las propiedades del sólido pueden modificarse por intercambio iónico o reacciones redox que permitan fabricar específicamente el catalizador adecuado. Aunque las redes aislantes (no con-

ductoras) están prácticamente confinadas a reacciones de catálisis ácido-base de sustratos orgánicos (sustitución, condensación, eliminación, isomerización, oligomerización, polimerización), también pueden participar en algunas reacciones redox como la hidrogenación, por intercalación de metales de transición como el paladio o el níquel.

Algunos compuestos de intercalación encuentran aplicación como **dispositivos electroquímicos**, como membranas, sensores, conductores iónicos y materiales catódicos en baterías secundarias. Así, la intercalación de éteres corona y criptandos en silicatos laminares permite la obtención de membranas selectivas de iones, es decir, membranas que dejan pasar unos iones a sus través y excluyen otros, en función del tamaño. También pueden actuar como electrolitos sólidos, porque presentan una conductividad iónica que está asociada con la presencia de los cationes interlaminares. En estos materiales, la contribución de los aniones de las láminas a la conductividad es nula, por lo que pueden diseñarse nuevos electrolitos organo-inorgánicos, eligiendo la especie huésped (catión interlaminar) adecuada. Por otra parte, la intercalación de ciertos polímeros electroactivos (conductores) en óxidos de metales de transición (xerogel  $V_2O_5$ ) y en calcogenuros ( $MoS_2$ ) conduce a la formación de materiales muy prometedores como electrodos positivos modificados para baterías recargables basadas en la inserción de iones litio. De hecho, la intercalación de polímeros como el óxido de polietileno puede facilitar la movilidad de los iones litio y aumentar la eficacia de estos sistemas. También puede realizarse la intercalación de polímeros conductores pero de tipo electrónico, tales como la polipiridina o la polianilina, aumentando así la conductividad electrónica del material, que es un requerimiento fundamental para el diseño de electrodos de batería eficientes. Por otro lado, algunos compuestos de intercalación presentan cambios de color

reversibles, dependiendo del estado de carga en la celda galvánica y tienen, por tanto, interés como dispositivos electrocrómicos pasivos.

Una de las aplicaciones más interesantes de ciertos compuestos de intercalación en el campo de la electroquímica es su uso como electrodos de baterías reversibles o secundarias, en el que nos extenderemos algo más. Un gran número de calcogenuros de metales de transición y óxidos encuentran aplicación en este aspecto, siendo el sistema  $Li/TiS_2$  el primero que se comercializó como batería secundaria.

Recordemos que una batería es un dispositivo que transforma directamente la energía química contenida en los electrodos en energía eléctrica a través de una reacción electroquímica de oxidación-reducción. Todos hemos sido testigos del espectacular aumento de las aplicaciones portátiles, especialmente la electrónica portátil, teléfonos móviles, ordenadores portátiles, las nuevas agendas electrónicas... Las pilas y baterías clásicas no sirven para estas aplicaciones, sobre todo porque su autonomía es muy reducida, por lo que surge la necesidad de disponer de nuevas baterías avanzadas que sean recargables y que tengan una elevada densidad de energía, que aumente la autonomía del equipo. Además, deben pesar poco y tener un tamaño reducido, sin olvidar, por supuesto, un hecho fundamental: deben ser ecológicas, es decir, presentar un bajo impacto medioambiental.

De las diferentes tecnologías de baterías que se están desarrollando, las denominadas baterías de ión litio son las que mejor cumplen todos estos requisitos y por ello se consideran la última generación de las baterías avanzadas. La característica más representativa de las baterías de ión-litio es que ambos electrodos están formados por compuestos de intercalación que son capaces de insertar y desinsertar iones litio en su estructura de forma reversible. Esta configuración de las baterías de ión litio hace que durante el funcionamiento de las mismas, nunca se forme litio metálico en la batería.

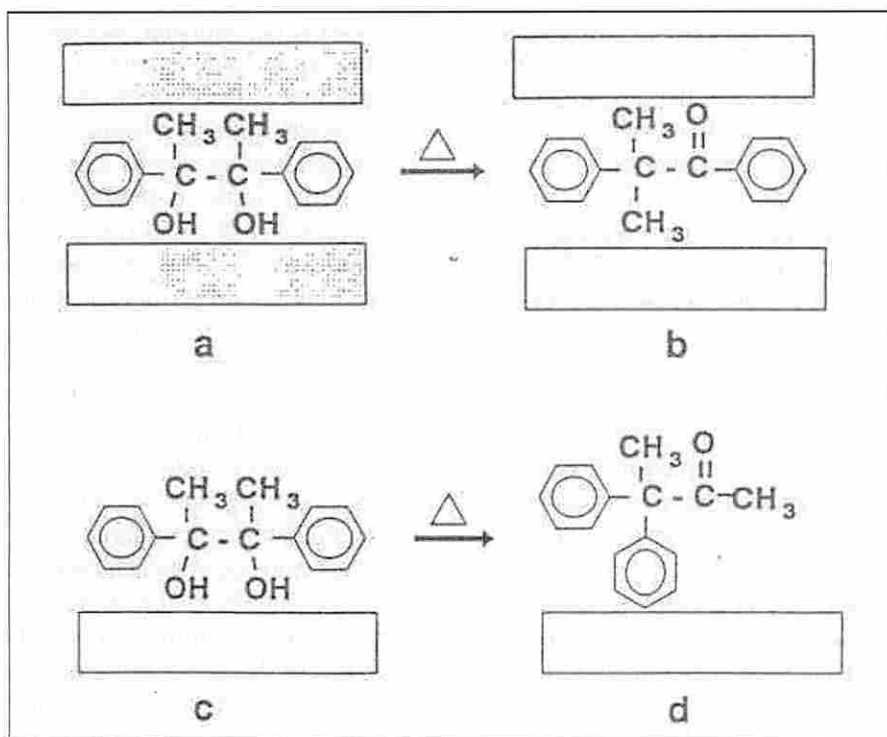


Figura 2. Influencia de la formación de un compuesto de intercalación sobre la selectividad en una determinada reacción. La transposición pinacolínica del 2,3 butanodiol desarrollada en la región interlamilar de una esmectita (a) (silicato laminar) o bien en su superficie externa (c), da lugar a diferentes compuestos carbonílicos (b y d, respectivamente)

En todo momento el litio se encuentra en su forma no reactiva, es decir, como ión litio. Este hecho aumenta notablemente la seguridad de estos dispositivos.

A continuación, explicaremos brevemente el funcionamiento de una batería de ión litio comercial (Figura 3). En concreto, se trata de una batería de ión litio formada por grafito como electrodo negativo y por cobaltita de litio ( $\text{LiCoO}_2$ ) como electrodo positivo. El electrolito en estas baterías es una disolución no acuosa de una sal de litio con un anión voluminoso en un disolvente orgánico de tipo aprótico (que no contiene protones). Desde que la compañía Sony comercializó en 1991 la primera batería de ión litio, esta configuración es la adoptada por la mayoría de las baterías de ión litio comerciales. Como ocurre en la totalidad de baterías de ión litio comerciales, el material que aporta los iones litio es el material de electrodo positivo, en este caso la cobaltita de litio. Este hecho supone que la batería, tras ser ensamblada, se encuentra en estado descargado, es decir no se

puede usar directamente. Por ello lo primero que hay que hacer al comprar una de estas baterías es cargarla. La cobaltita de litio tiene una estructura laminar. Durante la etapa inicial de carga de la batería, los iones litio son extraídos del espacio interlamilar de la cobaltita, por lo

que para asegurar la electroneutralidad del óxido, el  $\text{Co}^{3+}$  se oxida a  $\text{Co}^{4+}$  cediendo un electrón. Los iones litio son transportados a través del electrolito, que se trata de un medio aislante electrónico pero con buena conductividad iónica. Finalmente, estos iones litio se acaban insertando en el electrodo negativo, es decir, entre las láminas de grafito. Simultáneamente el grafito acepta electrones provenientes de la cobaltita y se reduce. Al final de esta etapa de carga la batería ya está lista para su funcionamiento. Por ello, de una forma rigurosa, los verdaderos materiales activos de esta batería son la cobaltita deslitiada y el grafito litiado. Durante la etapa de descarga de la batería, es decir, durante su utilización, las reacciones electroquímicas que tienen lugar son las contrarias. Así, el litio se desinserta del grafito y tras ser transportado por el electrolito se inserta en la cobaltita de litio, recuperándose el compuesto  $\text{LiCoO}_2$  al final de la descarga. Respecto a los electrones, éstos se transfieren por el circuito exterior permitiendo el funcionamiento del equipo que integra la batería.

Las baterías de ión litio presentan una serie de ventajas respecto a sus más directas competidoras, las baterías recargables de níquel/cad-

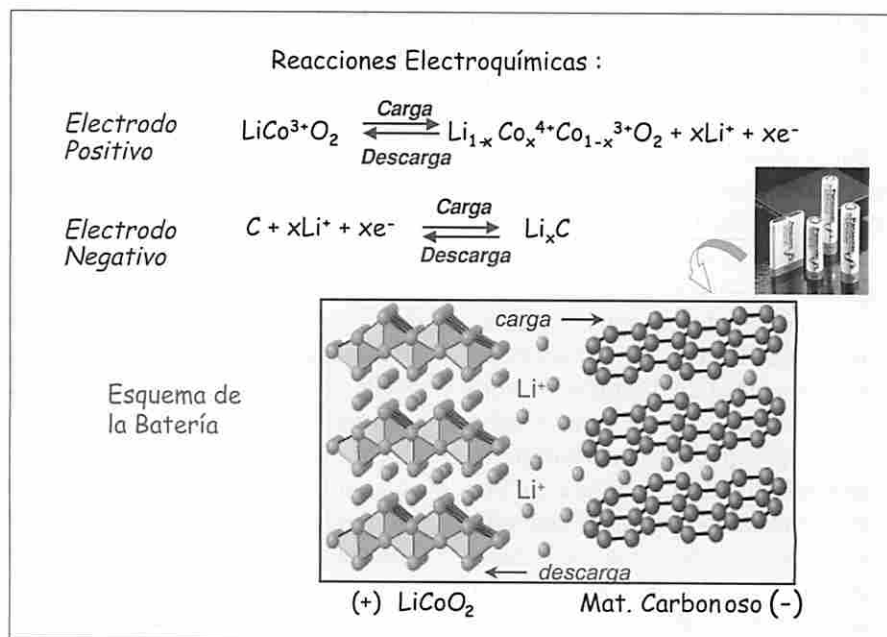


Figura 3. Funcionamiento de una batería de ión litio comercial:  $\text{C}/\text{LiPF}_6/\text{LiCoO}_2$ .

mio (Ni/Cd) o las de níquel/hidruro metálico (Ni/HM). En primer lugar, hay que destacar el elevado voltaje de las baterías de ión litio. Típicamente, el voltaje de una batería de ión litio es próximo a 4V, esto es, más de tres veces el valor del voltaje de las baterías de Ni/Cd o Ni/HM (1.2 V). Por su elevado voltaje, una de las principales ventajas de las baterías de ión litio es su alta densidad de energía, tanto en volumen como en masa. Ambas densidades presentan valores superiores entre un 20% y un 40% a las baterías de Ni/Cd o Ni/HM. Estos valores significan que, para una densidad de energía dada, una batería de ión litio pesa notablemente menos que una batería de níquel-hidruro metálico. Algo similar ocurre si nos referimos al volumen de la batería. No es difícil comprender que ambos aspectos, masa y volumen,

son determinantes en cualquier aplicación portátil. Otra ventaja importante de estas baterías es la ausencia del conocido efecto memoria que tienen las baterías de Ni/Cd o Ni/HM. Esto significa que una batería de ión litio puede ser recargada en cualquier momento sin peligro de que la batería pierda parte de su capacidad inicial. Por último, las baterías de ión litio presentan un bajo impacto medioambiental, como consecuencia de que no contienen elementos tóxicos como cadmio, mercurio o plomo, generalmente utilizados en otros tipos de baterías. Todas estas ventajas explican el por qué las baterías de ión litio están consideradas como la última generación de las baterías avanzadas, siendo además, un claro ejemplo de aplicación de un compuesto de intercalación en la vida cotidiana.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Intercalation compounds, R Schöllhorn, en *Inclusion compounds*, Vol. I. Eds. J.L. Atwood, J.E: Davies y D.D. MacNicol. Academic Press, Londres, 1984.
- [2] Inorganic intercalation compounds, Dermot O'Hare, en *Inorganic Materials*, 2º Ed. Eds. Duncan W. Bruce y Dermot O'Hare. John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [3] Intercalation Chemistry, Allan J. Jacobson, en *Encyclopedia of Inorganic Chemistry*, Vol. 3, Ed. R. Bruce King. John Wiley & Sons, Chichester, 1994.
- [4] Intercalation Chemistry, Eds. M.S. Whittingham y A.J. Jacobson, Academic Press, New York, 1982.

**M.ª Luisa Rojas Cervantes**  
Dpto. de Química Inorgánica y  
Química Técnica

## NOVEDADES CIENTÍFICAS

### Novedades científicas en Física en el año 2003

#### ASTROFÍSICA Y COSMOLOGÍA

- Cada año aparecen nuevos datos y más precisos sobre la radiación cósmica de fondo que aportan nueva información sobre la estructura y la historia del Universo. En 2003 se hicieron públicos los primeros estudios de los datos suministrados por la sonda *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (Wilkinson es el apellido de uno de sus diseñadores, muerto recientemente). El WMAP fue lanzado en junio de 2001 para situarse en el Punto Lagrangiano L2 a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra. (De este modo, el satélite orbita alrededor del Sol con el mismo periodo que la Tierra, pese a estar a una distancia mayor.) Lo que se deduce de estos datos es que el Big Bang tuvo lugar hace  $13,7 \pm 0,2$  miles de millones de años y la radiación cósmica refleja el estado

del Universo  $379 \pm 8$  miles de años después. Los datos confirman que hubo una etapa inflacionaria aunque queda descartado el modelo de inflación caótica. Además de la anisotropía, el WMAP ha medido la polarización de la radiación, de donde se puede deducir la época de la reionización debida a la formación de las primeras estrellas (ver 100cias@uned nº 5, 2002). Esto ocurrió 200 millones de años después del Big Bang, es decir, unos 500 millones de años antes de lo que se pensaba hasta ahora. Estos datos de WMAP se complementan con los del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) basado en tierra que ha examinado más de 200.000 galaxias. De ellos se deduce que el Universo contiene un 4% de materia bariónica, un 23% de materia oscura y un 73% de energía oscura. También fija una cota superior de 0,6 eV para la masa del neutrino.

- No obstante lo anterior, tan sólo una tercera parte de este 4% que constituye la materia bariónica está en forma de estrellas y galaxias. Ahora se han descubierto en el grupo local nubes de oxígeno de baja densidad que podrían dar cuenta del otro tercio.
- La abundancia de elementos químicos en las estrellas más antiguas de la Vía Láctea es de sólo entre 1/10 y 1/100 de las abundancias en el Sol. Por ello se pensaba que la evolución de los elementos químicos requería mucho tiempo. Para estudiar esta evolución a lo largo de la historia del Universo se comparan los espectros de galaxias con edades diferentes, es decir, situadas a diferentes distancia de la Tierra y con diferentes desplazamientos hacia el rojo. El problema es que las galaxias muy lejanas son muy poco brillantes. Este problema se puede soslayar cuando detrás de la galaxia a estudiar y exactamente en la misma visual hay un cuasar que proporciona la