

# Trazando el paisaje nuclear 50 años de historia de la *Karlsruher Nuklidkarte*

Christophe Normand y M<sup>a</sup> José G<sup>a</sup> Borge

La emisión de radiación en sales de uranio se conoce desde hace más de cien años. La recopilación de datos nucleares a través de gráficos de núcleos comenzó en los años 20 con el trabajo de Soddy. Más tarde se concretó en lo que constituye la *Karlsruher Nuklidkarte*. Este mapa del paisaje nuclear ha ilustrado durante 50 años el estado de nuestro conocimiento del mundo nuclear en un sencillo folleto. Surgió como una herramienta científica y educativa que permite conocer los fundamentos básicos que la comunidad de Física Nuclear necesita para construir el conocimiento físico a nivel del fermi ( $10^{-15}$  m). La información sobre los núcleos es un puente entre la investigación y el desarrollo. Por una parte, el núcleo puede ser considerado como un amplio laboratorio con la posibilidad de comprobar desde los conceptos fundamentales del Modelo Estándar hasta la génesis de los elementos en el Universo. Por otra, esta información se dirige también a personal que aplica técnicas nucleares a distintas áreas de la vida diaria como la asistencia médica o la vigilancia medioambiental. En esta nota histórica describimos la elaboración de este gráfico nuclear desde sus comienzos y su relevancia a lo largo de sus más de 50 años y sus siete ediciones que han incorporado los descubrimientos realizados en este campo.

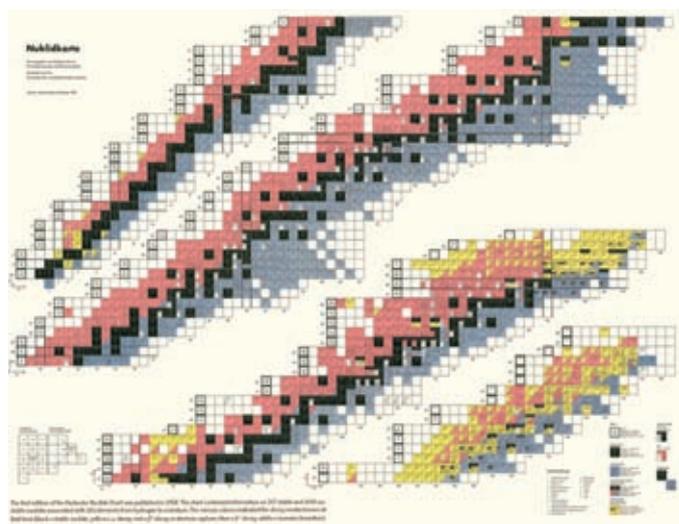
## 1. Introducción

El mapa de núcleos *Karlsruher Nuklidkarte* ha registrado desde 1958 el trabajo de miles de físicos y cientos de miles de resultados experimentales producidos en institutos de investigación de todo el mundo. Con la excelencia como regla, ha llegado a ser a través de los años una referencia en el campo de la información nuclear.

El descubrimiento de la Radiactividad en 1896 por Becquerel suministró la primera piedra sobre la que se basa el descubrimiento de los núcleos. Los trabajos de Soddy que condujeron al descubrimiento de la existencia de isótopos (átomos de igual carga Z y distinto número másico A) o de Joliot-Curie quienes descubrieron la producción de núcleos artificiales han permitido paso a paso la exploración de nuestro paisaje nuclear. Los desarrollos técnicos alrededor de la 2<sup>a</sup> Guerra Mundial permitieron acceder a más y mejores técnicas de producción y detección de núcleos desconocidos y, poco a poco, los investigadores comenzaron a reunir datos que proporcionaban una visión general del conocimiento del campo.

Fea en 1936 [1] en Italia, Seaborg [2] en 1940 en Estados Unidos o Rizler [3] en 1942 en Alemania, fueron pioneros en

la recopilación sistemática de información sobre los núcleos observados. Por ejemplo en 1940 Seaborg listó 367 núcleos radiactivos y 276 núcleos estables en su recopilación [2]. La cuestión era cómo representar gráficamente los núcleos. Una primera solución fue trazar el número másico A frente al número atómico Z. En 1945, E. Segrè en Los Alamos propuso el primer diagrama del mundo moderno representando el número de neutrones N en función de Z. El éxito de esta representación fue tal que aún hoy en día algunas personas continúan llamando a los gráficos de núcleos “Carta de Segrè”, a pesar de que en la representación actual se invierten los ejes. Desde entonces, varios gráficos de núcleos y bases de datos se han creado en todo el mundo. En 1958, W. Seelmann-Eggebert y G. Pfennig del Centro de Investigación (Forschungszentrum) de Karlsruhe editaron la primera versión de lo que conocemos como *Karlsruher Nuklidkarte* [4], ver figura 1.



**Fig.1.** Primera edición en 1958 de la *Karlsruher Nuklidkarte*. Obsérvese que el azul grisáceo se ha cambiado por un azul vivo en su versión actual. Por cortesía del Forschungszentrum Karlsruhe.

## 2. “El profesor Alemán: W. Seelmann-Eggebert”

En Diciembre de 1938, Otto Hahn y sus colaboradores descubrieron el fenómeno de la fisión nuclear. Algunos meses antes Walter Seelmann-Eggebert se unió a este grupo para empezar sus estudios de doctorado en el Kaiser Wilhelm Institut en Berlín [5]. Él trabajó durante varios años en el grupo de Hahn, primero como estudiante hasta su examen en

1940 y luego como ayudante. El laboratorio estaba ubicado en Berlín antes de su destrucción en 1943 y luego fue trasladado a Tailfingen en 1944. Seelmann-Eggebert fue un brillante investigador que construyó varios sistemas de detección utilizados a menudo en los estudios realizados en este laboratorio. En 1945 el grupo de Hahn había demostrado la existencia de 25 elementos y 100 isótopos como productos de fisión. Después de la 2ª Guerra Mundial continuó trabajando en Tailfingen hasta 1948. Este laboratorio después de la guerra siguió siendo dirigido, excepcionalmente, por los mismos científicos alemanes debido al prestigio de O. Hahn y F. Strassmann.

Al final de la guerra, los aliados trataron de transferir el conocimiento de los científicos alemanes a sus propios países. Sus resultados apenas se publicaron durante el periodo de la guerra y en varios campos como la Genética o la Física Nuclear, ellos habían avanzado considerablemente. Algunos de sus resultados se publicaron en artículos de revisión [6] y los propios investigadores se ofrecieron a trabajar para los países aliados. Argentina y Brasil se propusieron también como destino alternativo para estos investigadores, así varios científicos austriacos y alemanes se trasladaron a estos países. En 1949, Walter Seelmann-Eggebert, ver fig. 2, se unió a la Universidad de Tucumán en Argentina para crear un Departamento de Radioquímica. En 1951 se creó en este País la *Comision Nacional de Energía Atómica*, y repartió su tiempo entre Tucumán y Buenos Aires, debido a su gran capacidad para compartir sus conocimientos, se las arregló para crear en ambos lugares grupos de Radioquímica de alto nivel. En 1955, en la conferencia sobre el uso pacífico de la radioactividad, en Viena, la comunidad internacional se sorprendió gratamente con el anuncio del descubrimiento de 10 nuevos isótopos en Argentina [7]. El trabajo prosiguió durante los años siguientes y condujo al descubrimiento de 10 nuevos núcleos.

En 1956, Otto Hahn le llamó a participar en el desarrollo de la Radioquímica en Alemania, y se unió al grupo de Mainz antes de llegar a ser director del grupo de Radioquímica en el nuevo centro de investigación, *Insto. de los elementos Transuránidos*, de Karlsruhe. A lo largo de los años mantuvo sus relaciones con Argentina y continuó colaborando con sus colegas desde Alemania.



**Fig.2.** G. Pfennig y W. Seelmann-Eggebert, los dos primeros autores de la *Karlsruher Nuklidkarte* con el ganador del Premio Nobel G.T. Seaborg a la izquierda, en 1951. Foto cortesía del Forschungszentrum Karlsruhe.

En 1958, publicó junto con Gerda Pfennig la primera edición del *Karlsruher Nuklidkarte*. Reuniendo los principales datos conocidos en aquella época, cada cajita contenía información para cada núcleo sobre el modo de desintegración, semivida, razones de ramificación, radiaciones emitidas, abundancias y secciones eficaces. Desde entonces, 7 ediciones han ilustrado la aventura de las ciencias nucleares en la segunda mitad del siglo XX y un total de siete editores han contribuido al diagrama. De los dos editores iniciales, Gerda Pfennig ha estado siempre presente en esta aventura científica y Walter Seelmann-Eggebert participó en las cinco primeras ediciones antes de su muerte en 1988. La sexta edición se dedicó a su memoria. Otros colaboradores del centro de investigación de *Karlsruhe* como G. Zundel y H. Münzel se unieron al equipo para la segunda edición en 1961. H. Münzel llegó a ser un colaborador habitual hasta la quinta edición en 1981. H. Klewe-Nebenius participó en la quinta edición y en la sexta edición en 1995. El *Instituto de los elementos Transuránidos* tomó el liderazgo del proyecto para la séptima edición con la contribución de J. Magill and J. Galy y, por supuesto, de G. Pfennig [8].

Con el objetivo de hacer accesible esta información al mayor número de personas posible, además de su versión original en alemán y su traducción al inglés, se tradujo desde el principio al francés y al español gracias a los conocimientos adquiridos por Seelmann-Eggebert en Argentina. La última edición se ha traducido también al ruso y al chino.

Con el paso de los años, el éxito de la *Karlsruher Nuklidkarte* ha sido permanente, con más de 350.000 ejemplares vendidos, se ha incluido en varios libros de texto de Física Nuclear. La primera edición tuvo una gran acogida entre la comunidad científica. Su gran éxito, combinado con el rápido aumento del descubrimiento de nuevos núcleos, condujo a una segunda edición en 1961. W. Strohmeier comentó en 1964: “Este libro es una ayuda indispensable para todos los que trabajen con radio-núcleos. Su publicación es por lo tanto muy bienvenida y su bajo precio lo sitúan al alcance de todos”. Con periodicidad de unos seis años en su reedición, después de la quinta edición, en 1984, hubo un periodo largo durante el cual no se aportaron nuevos trabajos y se sacó una sexta y última edición en 1995. H. Klewe-Nebenius [9] explicó a la comunidad que debido a un cambio estratégico en la política científica del Forschungszentrum Karlsruhe, junto con la jubilación de G. Pfennig, este “best seller” había llegado a su fin.

El “Renacimiento nuclear” desde un punto de vista social dio lugar a que la *Karlsruher Nuklidkarte* tuviera también su propio renacimiento. En 2006, se publicó la séptima edición [8] traducida también al ruso y chino y con un folleto detallado sobre la física relacionada con los núcleos. Esperada por la comunidad se le dió una calurosa bienvenida obteniendo esta nueva edición el mismo éxito que las anteriores.

En un momento en el que las bases de datos son más y más numerosas y con un mejor acceso a la información a través de las nuevas tecnologías e internet, la *Karlsruher Nuklidkarte* mantiene su identidad. Se han realizado acuerdos con editores de otros diagramas de núcleos, así el diagrama de núcleos de la General Electric en Estados Unidos se ha

asociado con la *Karlsruher Nuklidkarte*. Además hoy día, el equipo de la “*Karlsruher Nuklidkarte*” colabora en proyectos internacionales sobre datos de estructura nuclear supervisados por la Agencia Internacional de Energía Atómica y por la Agencia de Energía Nuclear.

Su 50 aniversario ha sido una excelente oportunidad para hacer balance de la evolución del campo de las ciencias nucleares. Unos 60 científicos de todas las ramas de la Física Nuclear colaboraron exponiendo los temas más punteros del campo en un libro conmemorativo [10] que trata los diversos aspectos del paisaje nuclear. En él se presentan contribuciones que describen desde la Radioquímica de elementos superpesados a la terapia con iones pesados. Se puede encontrar también en este libro [10] una reseña histórica sobre este mapa del paisaje nuclear. Una nueva versión de la séptima edición del mapa nuclear se publicó en acceso directo en julio de 2009. Esta información se encuentra en el sitio web, [www.karlsruhenucleidechart.net](http://www.karlsruhenucleidechart.net) que ofrece además boletín de noticias, traducciones adicionales, información científica o comunicados de prensa.

### 3. “Nuestro Paisaje Nuclear”

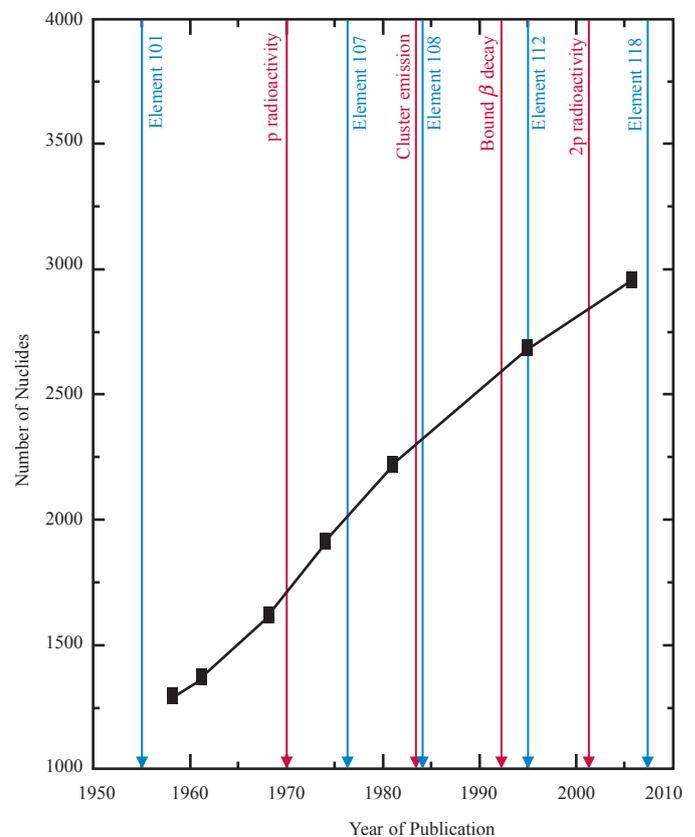
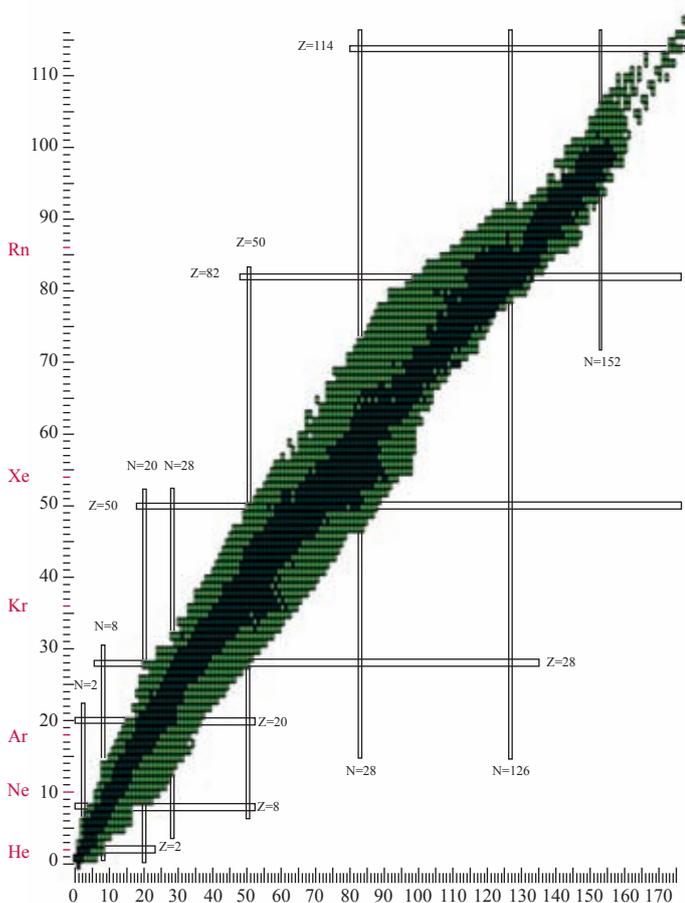
Como se muestra en la figura 3, la superficie de nuestro paisaje nuclear se ha extendido durante los últimos 50 años. En 1958 se conocían 1.300 núcleos y en el momento actual se han identificado más de 3.000 aunque los cálculos teóricos, predicen la existencia de más de 6.000 núcleos. La figura 3 compara

en la parte izquierda los núcleos conocidos en 1958, en oscuro, con los identificados actualmente, en verde, y en la derecha muestra un gráfico con la evolución de los núcleos conocidos en las distintas ediciones de la “*Karlsruher Nuklidkarte*”.

Desde el principio los autores del mapa nuclear han proporcionado una recopilación visual basada en un didáctico código de colores asociado con los distintos modos de desintegración. A través de los años no sólo se descubrieron nuevos núcleos, sino nuevos elementos, además de modos de desintegración, añadiendo nuevos colores a la paleta para designar su desintegración.

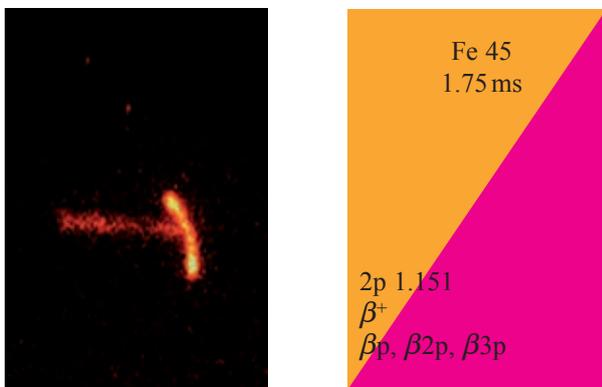
Los núcleos estables constituyen un número reducido y en ellos se basan las primeras descripciones y modelos. Observando la elevada estabilidad para ciertos números de protones y neutrones, los físicos nucleares partiendo de la semejanza con el modelo atómico desarrollaron el tan conocido “modelo de capas”. Estos números especiales se llaman números mágicos y existen para protones y neutrones, de este modo a diferencia de un átomo, un núcleo puede ser doblemente mágico. Los números mágicos se indican con líneas en la fig.3. Sin embargo, experimentos recientes han demostrado que nuevos números mágicos caracterizan el paisaje nuclear lejos del valle de la estabilidad.

Para un número fijo de protones la cuestión es ¿cuántos neutrones puede ligar un núcleo? A ambos lados del gráfico hay límites, para los núcleos ricos o deficientes en neutrones, las llamadas línea de goteo neutrónica y

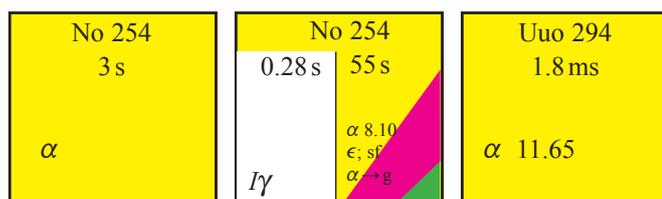


**Fig.3.** Izquierda: Núcleos presentes en la primera edición de la *Karlsruher Nuklidkarte* (oscuro) y hoy (verde). Derecha: Número de núcleos conocidos en las distintas ediciones de la *Karlsruher Nuklidkarte*. Una línea del tiempo muestra los principales descubrimientos ocurridos durante ese periodo.

protónica, respectivamente. Más allá de estas líneas hay estados resonantes los cuales tienen vidas medias muy cortas dependiendo de la anchura de la resonancia. La línea de goteo del protón se conoce hasta el Bismuto con 83 protones, y ha sido cruzada en los núcleos asociados a los fenómenos de radiactividades de un protón y dos protones. La radioactividad de un protón se observó por primera vez en 1981 [12]. Hoy se conocen cerca de 50 emisores de protones [13], de los cuales casi la mitad son estados isoméricos, es decir, estados excitados de vida larga. Se ha dado un gran paso con el descubrimiento de la radiactividad de dos protones en 2002 [14] ya que permite estudiar las correlaciones de los nucleones dentro del núcleo. De hecho se han observado y medido, recientemente, estas correlaciones entre los dos protones de baja energía emitidos gracias a las nuevas técnicas de detección de trazado iónico [15] tal y como se muestra en la figura 4.



**Fig. 4.** Izquierda: Grabación de la desintegración de  $2p$  en  $^{45}\text{Fe}$  mediante una cámara de ionización. Se muestra la traza de un ión  $^{45}\text{Fe}$  entrando desde la izquierda. La dos pequeñas trazas en que se desintegra son protones de  $\sim 0.6\text{ MeV}$  (imagen cortesía de M. Pfützner). Derecha: Información actualizada del núcleo  $^{45}\text{Fe}$  donde se enumeran todos los modos de desintegración.



**Fig. 5.** Nobelio era el elemento más pesado conocido en la primera edición de 1958 y se sabía que era emisor alfa, imagen de la izquierda. En la 7ª edición, podemos ver la paleta de colores que indican los modos de desintegración de Nobelio 254, es decir, tiene un estado isomérico que se desexcita por emisión gamma ( $I\gamma$ ) con semivida de 0.28 s, y su estado fundamental, con 55 s, decae mayoritariamente por emisión alfa (amarillo), parcialmente por captura electrónica (rosa) y con menor probabilidad sufre fisión espontánea (verde). Ununocio es el elemento más pesado conocido hasta la fecha con 118 protones y también identificado como emisor alfa. Los elementos con  $Z > 111$  están a la espera de recibir su denominación otorgada por la IUPAP.

La línea de goteo del neutrón sólo se ha medido hasta  $Z=10$ . Los primeros emisores de neutrones ( $\beta n$ ) ya se conocían en 1958, pero no fue hasta la 3ª edición, en 1968, que se introdujeron en el gráfico. La mayoría de los núcleos no des-

cubiertos hasta el momento están en la región de los núcleos ricos en neutrones y en ella se han detectado los nuevos núcleos como es el  $^{229}\text{Rn}$  [16] identificado en 2009. Esta región participa en importantes procesos astrofísicos como el proceso-r, el cual juega un importante papel en la nucleosíntesis de muchos de los elementos conocidos como el Uranio u otros elementos más pesados que el Plomo.

En la parte superior del gráfico aparecen nuevos elementos que se han producido desde 1958 cuando el núcleo más pesado era un isótopo del Nobelio ( $Z=102$ ). Hoy día hay 15 elementos más pesados en la tabla de Mendeleev. En la figura 5, vemos el elemento más pesado de la primera edición y el Ununocio ( $Z=118$ ) que es el elemento más pesado conocido hoy en día.

Gracias al refinamiento en las técnicas de detección, también se determinan otras propiedades de los núcleos como las radiaciones emitidas o semividas. Se representan estas características en todo el gráfico. Distintos colores corresponden a los distintos modos de desintegración, así la radioactividad de un protón y de dos protones comparten el color naranja, la emisión del neutrón es azul clara. El violeta se reserva para la radioactividad de iones pesados descubierta hace 25 años [17] y que consiste en la emisión de un núcleo ligero más pesado que la partícula alfa, típicamente Carbono o Magnesio.

El principal modo de desintegración radiactiva, la desintegración beta, todavía ofrece muchas posibilidades de investigación y no sólo en relación con los misterios del neutrino. Por ejemplo, un modo poco frecuente de desintegración beta, la desintegración doble-beta tiene una típica semivida en el rango del peta-año ( $10^{15}$  años). La desintegración beta juega todavía hoy un papel destacado en el estudio de la estructura nuclear. Y los estudios de Litvinov y sus colaboradores en el GSI sobre núcleos altamente ionizados han cambiado nuestra visión acerca de este proceso de desintegración [18].

Temas recientes que añaden una nueva dimensión al mapa nuclear son la producción de los primeros anti-núcleos y de hiperones. Por un lado se han producido anti-hidrógeno, anti-deuterón y anti-helio 4, y, aunque estamos lejos de una “Anti-Química” propiamente dicha, se ha realizado el trabajo fundamental en este tema. Por otra parte recordando que el protón y neutrón están formados por *quark up* y *down* si en uno de ellos se intercambia un *quark* por otro llamado extrañeza se obtiene un hiperón. Este hiperón puede interactuar con protones y neutrones para formar un hipernúcleo que tiene una semivida semejante a la de los elementos transuránicos. Cerca de 30 hipernúcleos se han descubierto añadiendo otra dimensión al “clásico” gráfico de núcleos. Existe un gráfico de hipernúcleos disponible, más detalles se encuentran en [10].

#### 4. “Un paseo por el gráfico”

La información sobre los núcleos ha sido un puente entre la investigación y el desarrollo. Por una parte, el núcleo puede ser considerado como un amplio laboratorio con, por ejemplo, la posibilidad de comprobar conceptos fundamentales del Modelo Estándar. Por otra parte, esta información es reconducida hacia aplicaciones en muchas áreas de la vida diaria como la medicina, la datación o el control medioambiental.

La información nuclear y las técnicas nucleares han encontrado aplicaciones que se extienden desde la Biofísica de la radiación espacial hasta el patrimonio cultural. Algunos ejemplos recientes que han encontrado amplia cobertura en los medios de comunicación incluyen la terapia del cáncer, vigilancia medioambiental a través de análisis de corrientes de agua, Arqueología e Historia. Hoy tenemos más y más datos disponibles que se transforman en herramientas para obtener resultados. La Medicina es ciertamente uno de los campos que mas rápidamente ha incorporado los avances en Física Nuclear tanto en diagnóstico como en la eliminación de tumores malignos. Hoy en día ciertos estudios consideran la fiabilidad de técnicas similares para captar virus como VIH. Aplicaciones en Arte y Arqueología dan lugar con frecuencia a titulares en los medios de comunicación con ejemplos famosos como el Santo Sudario de Turín o el hombre de los Alpes de Ötzi. Recientemente un nuevo método de datación aplicable a las pinturas rupestres ha ocupado los titulares de los periódicos. La datación de las pinturas rupestres se hacía con un estudio de carbono-14 del carboncillo utilizado. Este análisis nos da la edad del carboncillo y no el de la pintura en sí. El nuevo método desarrollado por A. Pike [19] de la Universidad de Bristol y aplicado a las cuevas encontradas en el norte de España consiste en analizar la proporción de uranio y su hijo el torio en la patina de calcita depositada sobre la pintura rupestre. Así se ha encontrado que las pinturas no se realizaron simultáneamente si no en distintas fases a lo largo de unos 15.000 años.

## 5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a G. Pfennig, J. Magill, T. Fanghaenel, M. Pfützner, K. Mayer, J. Galy, R. Radicella y a todos los colaboradores de la celebración del 50 aniversario de la *Karlsruher Nuklidkarte*. Este trabajo ha estado parcialmente financiado por los proyectos del MICINN FPA2007-62170 y el proyecto Consolider CPAN (CSD2007-42).

## 6. Referencias bibliográficas

- [1] FEA, G., *Nuovo Cimento* **6**, 1 (1935) .
- [2] LIVINGWOOD, J.J., SEABORG, G. T., *Rev. Mod. Phys.* **12**, 30 (1940).
- [3] RIEZLER, W., *Tabellen und Tafeln zur Kernphysik*, Bibliographisches Institut, Leipzig, (1942).
- [4] SEELMANN-EGGEBERT, W., PFENNIG, G., *Karlsruher Nuklidkarte 1st Edition*, Germany, 1958.
- [5] SEELMANN-EGGEBERT, W., *Chimia* **33**, **8**, 275 (1979) .
- [6] SEELMANN-EGGEBERT, W., *FIAT Review of German Science*, Office of Military Government for Germany, Germany, p.91 (1948).
- [7] RADICELLA, R., *Ciencia e Investigación*, **3**, 52 (1999).
- [8] MAGILL, J., PFENNIG, G., GALY, J., *Karlsruher Nuklidkarte 7th Edition*, Haberbeck GmbH, Germany (2006).
- [9] *International Nuclear Data Committee*, report INDC(NDS)-329, October 1994.
- [10] PFENNIG, G., NORMAND, C., MAGILL, J., FANGHÄNEL, TH. (Editors), *Karlsruher Nuklidkarte: commemoration of the 50th anniversary*, Haberbeck, Germany (2008).
- [11] GAUDEFRY, L., ET AL., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 092501 (2009).
- [12] HOFFMANN, S., *Z. Phys. A* **305**, 111 (1982) .
- [13] BLANK, B. AND BERGE, M.J.G., *Progress in Particle and Nuclear Physics* **60**, 403 (2008).
- [14] PFÜTZNER, M., ET AL., *Eur. Phys. J. A* **14**, 279 (2002).
- [15] MIERNIK, K., ET AL., *Phys. Rev. C* **76**, 041304 (2007).
- [16] NEIDHERR, D. ET AL., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 112501 (2009).
- [17] ROSE, H.J. AND JONES, G.A., *Nature* **307**, 245 (1984).
- [18] YU. A. LITVINOV ET AL., *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 262501 (2007); *Phys. Lett. B* **664**, 162 (2008).
- [19] PETTIT, P.B. AND PIKE, A.W.G., *Journal of Archaeological Method and Theory* **14**, 27 (1) (2007).

**Christophe Normand**

*Institute for Transuranium Elements, Karlsruhe, Alemania*

**M<sup>a</sup> José G<sup>a</sup> Borge**

*Instituto de Estructura de la Materia, CSIC, Madrid*



Aula Documental  
de Investigación

c/ Martín de los Heros, 66  
28008 MADRID

Tel. 91 542 82 82

Fax. 91 559 30 60

<http://www.auladoc.com>