CSN
alfa
Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Consejo de Seguridad Nuclear
Número 30 / 2016

Centinelas en órbita

Los satélites Sentinel revolucionan la observación medioambiental

La Subdirección de Protección Radiológica Operacional, un área del CSN que vela por la Seguridad de los trabajadores

Javier Dies Llovera, consejero del CSN "El camino es ir hacia la eficiencia reguladora"

Centro de Láseres Pulsados (CLPU): el láser de Petavatio de Salamanca

Ondas gravitacionales: la última victoria de Einstein

Súmate a los 110.000

Desde su inauguración en 1998, los 110.000 visitantes del Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear han tenido ocasión de aproximarse al conocimiento sobre las radiaciones ionizantes, sus usos, sus riesgos y los controles y la protección que son necesarios para garantizar su utilización fiable, en la cual el CSN –como organismo encargado de la seguridad nuclear y la protección radiológica– juega un papel muy importante.

En la vida diaria utilizamos las radiaciones con una enorme frecuencia, tanto en relación con la salud y la medicina –en diagnóstico y en terapia– como también en la industria y en la investigación. A través de un recorrido guiado por los 29 módulos, se pueden conocer con detalle estos aspectos relacionados con las radiaciones. Consigue más información en www.csn.es/index.php/es/centro-informacion o pide cita en centroinformacion@csn.es Súmate a los 110.000.

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

120 años de radiactividad

Como ocurre a veces en la Ciencia, Antoine E. Becquerel descubrió por casualidad un fenómeno completamente nuevo. Dejó en un cajón un paquete de sales de uranio, encima de un rollo de placa fotográfica y, días después, comprobó que la placa estaba oscurecida como si le hubiera dado la luz; así que pensó que esas sales emitían unos rayos penetrantes, que eran capaces de atravesar metales. Sin embargo, Becquerel perdió interés en el tema y se lo pasó a una estudiante polaca que no tenía muy claro sobre qué hacer la tesis doctoral. Ella, Marie Curie, investigó mucho más a fondo esa materia que emitía constantemente tanta energía y parecía no consumirse, y bautizó aquello como radiactividad. Ella, Marie Curie, inaugura la nueva serie de artículos de **Alfa** que hemos denominado, *Ciencia con nombre propio*.

Abordamos, además los elementos de prevención en el campo de la protección y la seguridad radiológica así como de la seguridad física, que componen la denominada Cultura de Seguridad en las instalaciones y actividades con fuentes de radiación ionizante y que es objeto de un grupo de trabajo del Foro de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO).

Este grupo ha publicado un documento que se desgranamos en las páginas de **Alfa** y que busca proporcionar un marco para la introducción y la aplicación práctica del concepto de Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación, considerando las particularidades de la protección y la seguridad radiológica y física.

En España existen cerca de 1.400 instalaciones radiactivas que son supervisadas por la Subdirección de Protección Radiológica Operacional del Consejo de Seguridad Nuclear. Un área compuesta por 56 profesionales y sobre cuya actividad trata la sección *CSN por dentro*.

> *En los últimos meses, el CSN ha estado involucrado en dos importantes eventos internacionales que han tenido lugar en Madrid, de las que damos cuenta en las páginas de* **Alfa**

Las páginas de la entrevista están dedicadas a Javier Dies Llovera, consejero del CSN y catedrático de Ingeniería Nuclear con más de 240 trabajos científicos y tecnológicos publicados en diversos países y que, en su etapa iniciada en el organismo regulador, aboga por la exigencia diaria y una actitud de mejora continua de cara a la misión IRRS que afrontará España próximamente.

Además, conoceremos cómo funciona el Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos situado en Salamanca, la Infraestructura Científico Técnica Singular (ICTS) española especializada en láseres ultrapotentes y que alberga un láser pulsado con pulsos de 30 femtosegundos de duración, capaz de llegar al petavatio de potencia pico, lo que le convierte en uno de los láseres más potentes del mundo.

La sección Radiografía se centra, en esta ocasión, en los radiofármacos en España. Desde su fabricación mediante instalaciones con Ciclotrón pasando por su transporte y comercialización.

En los últimos meses, el CSN ha estado involucrado en dos importantes eventos internacionales que han tenido lugar en Madrid: la conferencia sobre seguridad física nuclear, organizada por el propio Consejo de Seguridad Nuclear; y la dedicada los programas de clausura y restauración ambiental del OIEA. De ambas damos cuenta en las páginas de **Alfa**, repasando las principales intervenciones y conclusiones.

Finalmente, pasearemos por la órbita terrestre de la mano de los satélites Sentinel, encargados de dar vida al sistema Copérnico cuya misión es la observación medioambiental, y no nos olvidamos de la denominada "última victoria de Einstein": las ondas gravitacionales.

aLFa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 30 / Año 2016

Comité Editorial
Fernando Marti Scharfhausen
Antonio Munuera Bassols
Fernanda Sánchez Ojanguren
Enrique García Fresneda
Ángel Laso D'Lom
Felipe Teruel Moya
Manuel Aparicio Peña
Ana Gozalo Hernando
Felipe Teruel Moya

Comité de Redacción
Ángel Laso D'Lom
Natalia Muñoz Martínez

Edición y distribución
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
Fax 91 346 05 58
peticiones@csn.es
www.csn.es

Coordinación editorial
Estugraf Impresores S. L.
Pol. Ind. Los Huertecillos, Nave 13
28350 Ciempozuelos (Madrid)

Fotografías
CSN, Estugraf, Miguel G. Rodríguez, Agencias (ThinkstockPhotos, Getty)

Impresión
Estugraf Impresores S. L.
Pol. Ind. Los Huertecillos, Nave 13
28350 Ciempozuelos (Madrid)

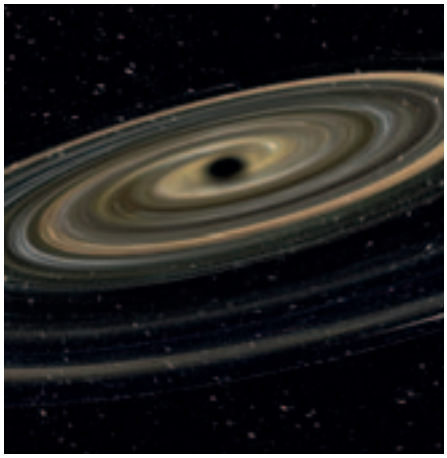
Fotografías de portada
Agencias

Depósito legal: M-24946-2012
ISSN-1888-8925

© Consejo de Seguridad Nuclear

Las opiniones recogidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de sus autores, sin que la revista 'Alfa' las comparta necesariamente.

REPORTAJES



06 **Ondas gravitacionales: la última victoria de Einstein**

El mundo de la física teórica vuelve a estar de enhorabuena: el observatorio LIGO de Estados Unidos confirma la detección directa de la relatividad general: las ondas gravitatorias. Las casi imperceptibles distorsiones del espacio tiempo habían sido generadas por la fusión de agujeros negros de 30 veces la masa del Sol y situados a 1.300 millones de años-luz de nosotros.

20 **Centro de Láseres Pulsados (CLPU)**
El láser de Petavatio de Salamanca

Con pulsos de 30 fotosegundos de duración, el láser VEGA del CLPU es capaz de alcanzar el petavatio de potencia pico, lo que le convierte en uno de los láseres más potentes del mundo. Cuando se focaliza puede llegar a intensidades extremas. Cómo interacciona un átomo con un pulso así o para qué sirve son algunas de las preguntas que se responden en este artículo.

38 **Ciencia con nombre propio. Marie Curie: la fe en lo invisible**

Se la ha llamado la madre de la relatividad. Combinó la pasión por la ciencia con el amor a su esposo y a sus hijas. Y llegó a donde ninguna investigadora había llegado hasta entonces en la búsqueda de los elementos desconocidos que escondían la clave de la radiación. Pero hay aspectos de la vida de Marie Curie que han trascendido más allá del ámbito científico.

56 **Los satélites Sentinel revolucionan la observación medioambiental**

Europa dispone de tres satélites Sentinel en órbita que son la columna vertebral del ambicioso sistema Copérnico. Destinado a revolucionar la observación medioambiental tanto en su vertiente científica como comercial, su objetivo es captar ingentes cantidades de datos sobre la Tierra para avanzar en la investigación del cambio climático, los océanos y la evolución de los hielos.

53 **RADIOGRAFÍA**

Fabricación de radiofármacos PET con ciclotrón en España

EL CSN POR DENTRO

28 La Subdirección de Protección Radiológica Operacional, un área del CSN que vela por la Seguridad de los trabajadores

La seguridad en el campo de las instalaciones radiactivas es una parte esencial de la protección radiológica de los más de 100.000 trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes. La Subdirección de Protección Radiológica Operacional se encarga de esta labor y de autorizar y mantener la seguridad de más de 1.340 instalaciones radiactivas repartidas por todo el país.

ENTREVISTA

14 Javier Dies Llovera, consejero del CSN

"El camino es ir hacia la eficiencia reguladora".

ARTÍCULOS TÉCNICOS

31 El CSN acoge en Madrid la Segunda Conferencia Internacional de Seguridad Física Nuclear

Organizada por el CSN, los días 9 al 13 de mayo pasados se ha celebrado en Madrid la segunda Conferencia Internacional de Seguridad Física Nuclear. El ministro del Interior en funciones anunció que doblará la presencia de efectivos de la Guardia Civil en la vigilancia de las centrales españolas.

35 Conferencia Internacional sobre el Fomento de la Aplicación Global de Programas de Clausura y Restauración Medioambiental

Con la Participación del CSN, se ha celebrado en Madrid, del 23 al 27 de mayo, la Conferencia sobre el Fomento de la Aplicación Global de Programas de Clausura y Restauración Medioambiental, organizada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)

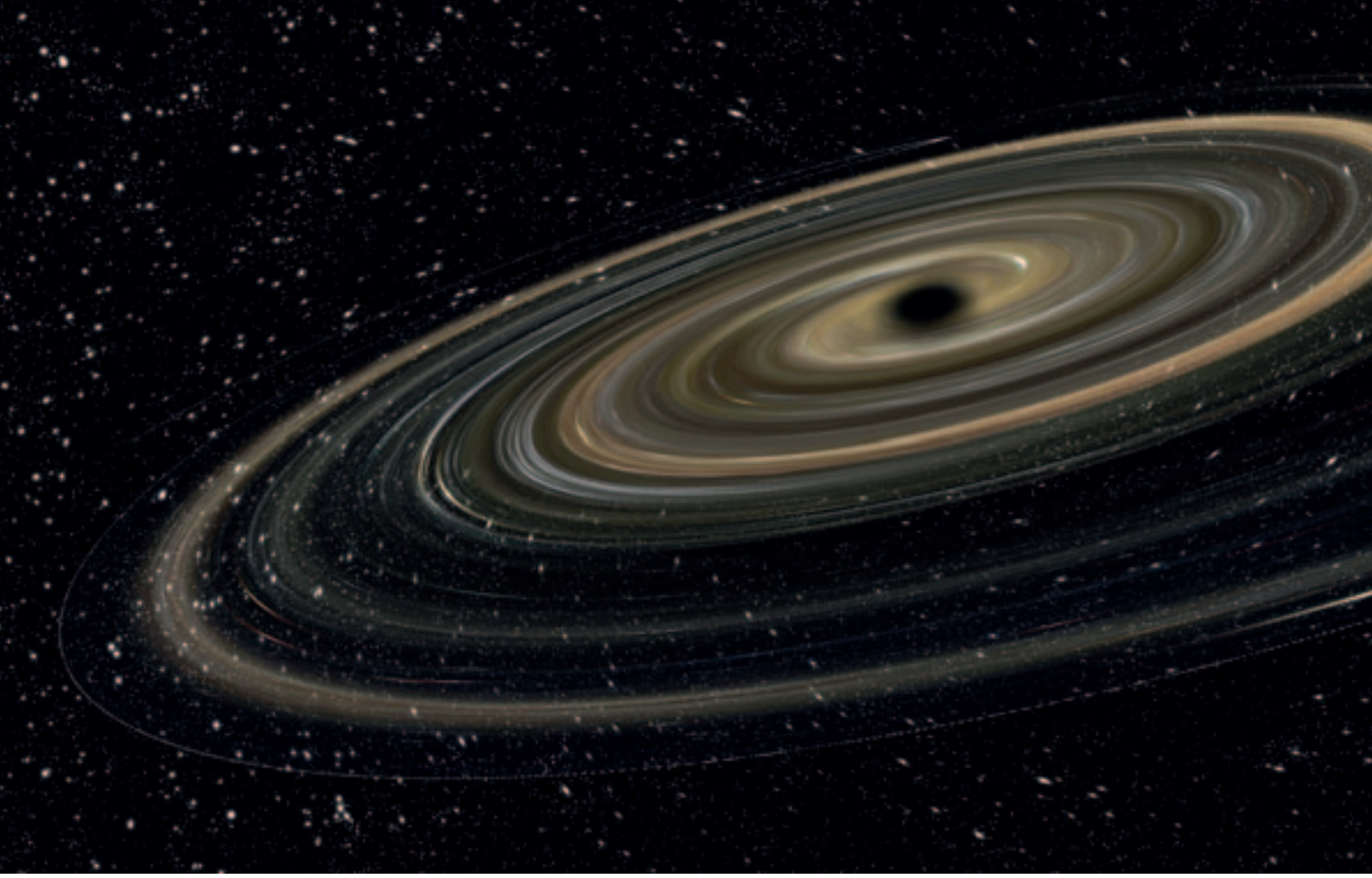
44 Cultura de Seguridad en organizaciones, instalaciones y actividades con fuentes de radiación ionizante

El Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares es una asociación creada en 1997 con el objetivo de promover la seguridad nuclear, radiológica y física al más alto nivel entre sus países miembros.

62 Reacción en Cadena
64 Panorama
68 Acuerdos del Pleno
69 csn.es
70 Publicaciones

Fe de erratas

En el número 29 de la revista **Alfa,** en la página 14, en el apartado 'Detectores compuestos' del artículo titulado 'Nueva Red de Estaciones Automáticas integrada en la Red de Vigilancia Radiológica Ambiental del CSN', se habla de "detectores gamma de cristal de centelleo para bajas tasas de dosis (aproximadamente hasta 250 Sv/h)", cuando los correcto sería decir que se trata de 250 MICRO sieverts (250 µSv/h).



El telescopio Fermi de la NASA detectó una colisión que se produjo aproximadamente 0,4 segundos después de que se registraran las ondas gravitacionales.

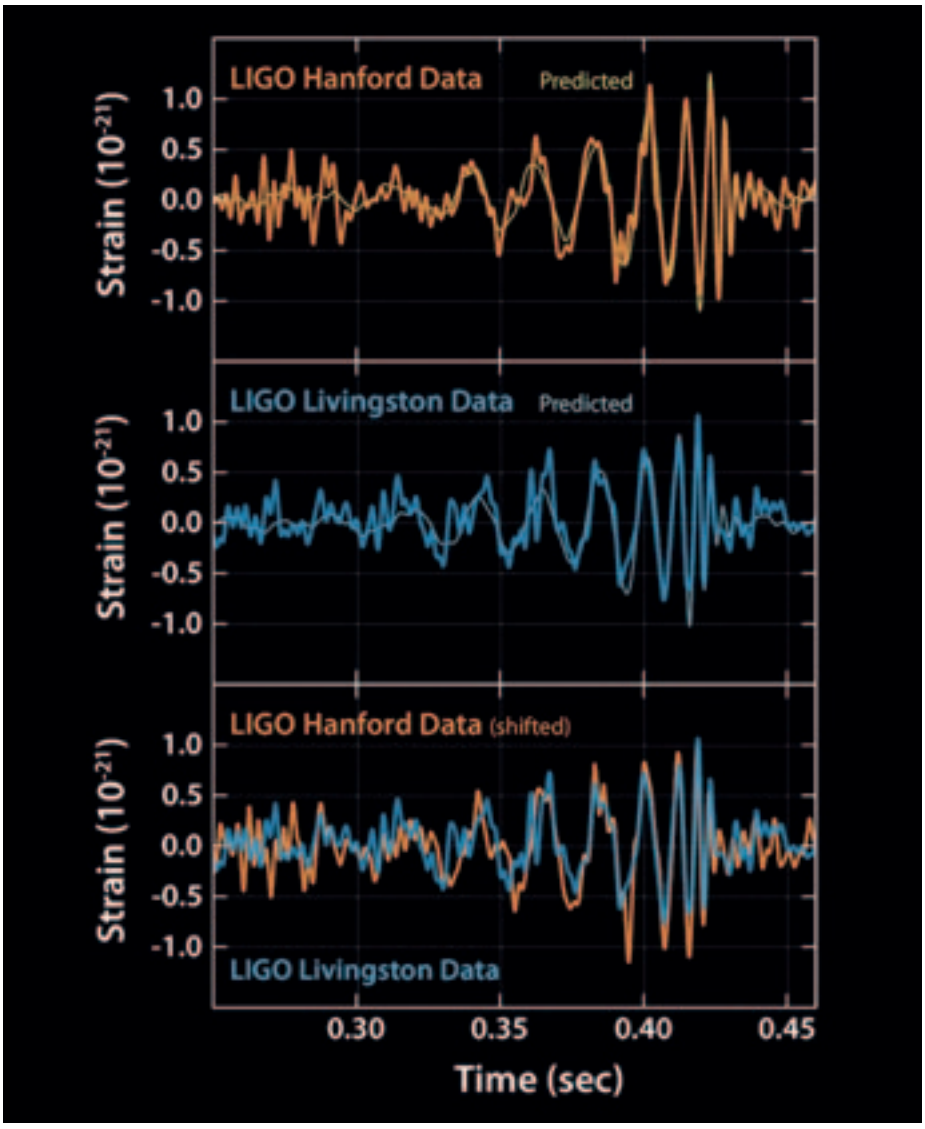
El Observatorio de Ondas Gravitatorias de Interferometría Láser confirma la detección directa de la relatividad general: las ondas gravitatorias

LIGO: la última victoria de Einstein

En la madrugada del 14 de septiembre de 2015 el mundo de la física teórica volvió a estar de enhorabuena: desde el Viejo Sur de Estados Unidos, en Louisiana, a casi dos kilómetros de la autopista 63 dirección norte, en el Observatorio de Ondas Gravitatorias mediante Interferometría Láser (LIGO) se registraba la primera detección directa de la última predicciones de la relatividad general: ondas gravitatorias. En este caso, las casi imperceptibles distorsiones del espacio-tiempo habían sido generadas por la fusión de dos agujeros negros de 30 veces la masa de Sol y situados a 1.300 millones de años-luz de nosotros.

Texto **Miguel Ángel Sabadell** | Periodista científico |

Lo mismo sucedía en el laboratorio hermano que se encuentra a 3.000 kilómetros de allí, en el estado de Washington, localizado en los terrenos del Hanford Site, el centro que en los años 40 proporcionó el plutonio necesario para construir la primera bomba atómica. Para el visitante ocasional, el observatorio de Louisiana es un edificio pintado en azul y blanco, con pocas florituras arquitectónicas. La sala en la que está instalado el instrumental tiene 90



Los científicos del LIGO confirmaron por vez primera la existencia de ondas gravitacionales por la colisión de dos agujeros negros a una distancia de más de 1.000 años luz de la Tierra.

metros de altura y el vestíbulo, en forma de cruz, parece un hangar. En cada uno de los extremos de la cruz hay unas portezuelas que dan a dos larguísimos tubos de 4 kilómetros de largo por 1,2 metros de ancho. Estos tubos forman una L a lo largo de un bosque de pinos -que hubo de ser nivelado- y junto a los cuales discurre un camino de casi dos metros y medio de ancho y un canal lleno de agua. Estos tubos quedan ocultos a la vista bajo varias capas de cemento de 15 centímetros de grosor que los protegen de las inclemencias meteorológicas y de las bajas perdidas de los cazadores. Un aspecto que no se parece en nada a lo que debería ser un observatorio destinado a comprender violentos fenómenos astronómicos.

Ciertamente la mayor parte de la información que nos llega del universo la recibimos en forma de ondas electromagnéticas, ya sean en el rango del visible, radio o infrarrojo (y, en menor medida, en rayos X y gamma), que recogemos con diferentes tipos de telescopios. Emitidas por átomos y electrones, nos proporcionan información sobre las características físicas de los objetos celestes: temperatura, luminosidad, masa, composición, edad... Por contra, las ondas gravitatorias nos hablan de algo totalmente distinto: nos informan de los movimientos de objetos muy masivos. LIGO –y sus otros hermanos menores situados en Alemania e Italia– están construidos para detectar los temblores del tejido del espacio-tiempo, que son provocados por los sucesos más violentos que podemos encontrar en el universo: explosiones de supernova, pares de estrellas de neutrones orbitando en común o, como ha sucedido en este caso, dos agujeros negros que giran y se aproximan hasta fusionarse.

Y es que las ondas gravitatorias son la última de las predicciones que hizo Einstein con su niña mimada, la teoría general de la relatividad. Complicada de entender, con esta teoría Einstein trastocó todo lo que se creía bien afianzado desde que Isaac Newton escribiera sus *Principia*. El genio alemán revolu-

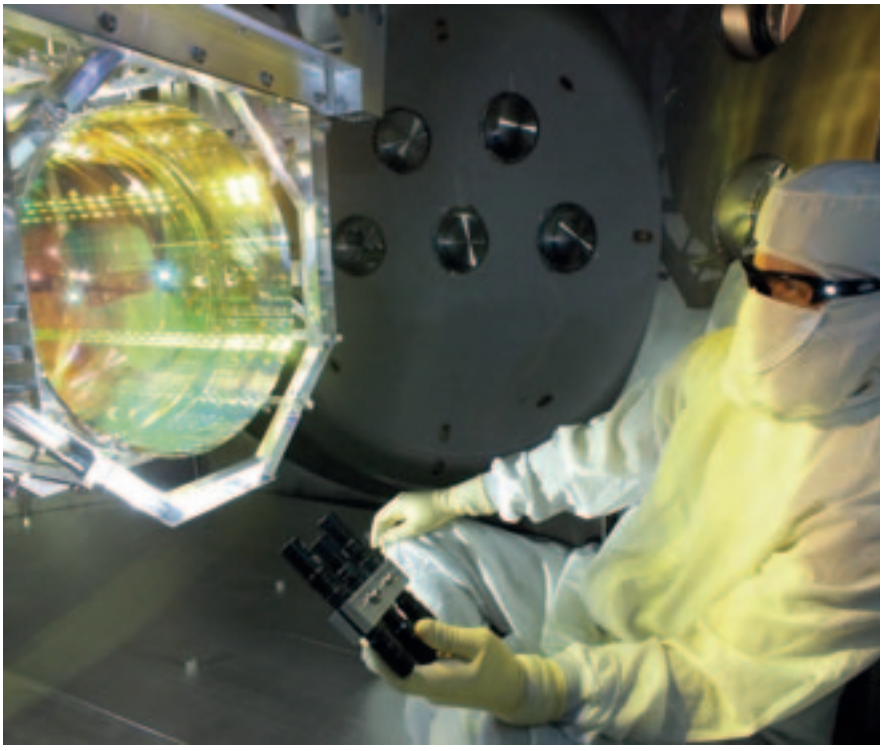
cionó nuestra forma de pensar al afirmar que la materia, el espacio y el tiempo no son entidades separadas y disconexas, sino que se encuentran íntimamente relacionadas y que es de esta relación de donde surge lo que llamamos gravedad. La relatividad general reveló que el espacio y el tiempo no son simples conceptos que sirven de base a los físicos para hacer sus cálculos sino que están indisociablemente unidos formando una entidad, el espacio-tiempo, cuya forma está determinada por la distribución de materia que posee a su alrededor. El gran físico y mentor de varios premios Nobel, John Archibald Wheeler, expresó con meridiana claridad lo que es la relatividad *einsteniana*: el espacio dice a la materia por dónde debe moverse, la materia dice al espacio cómo debe curvarse.

Desde que fuera presentada en público por Einstein en una memorable reunión de la Academia Prusiana de Ciencias en noviembre de 1915, la relatividad general ha vivido todas las situaciones posibles a lo largo de sus cien años de existencia. En 1919, al comprobarse su predicción de que la gravedad del sol curvaba la trayectoria de los rayos de luz, canonizó a su creador: se dio su nombre a niños y a puros; el London Palladium le pidió que se asomara a su escenario durante tres semanas, fijándose él mismo el sueldo, y los medios de comunicación tildaron sus teorías como los logros más importantes del pensamiento humano, publicando en primera página sus ecuaciones. Pero a pesar de toda esa fama, en el campo de la física durmió el sueño de los justos durante varios años. Como escribió la periodista científica Marcia Bartusiak, "era una curiosidad teórica admirada por todos pero apenas tenida en cuenta". Los pocos físicos que se dedicaban a explorar sus ecuaciones eran considerados como unos seres que vivían en una torre de marfil intelectual donde hacían cálculos complicadísimos. El problema era que ir más allá de la pirotecnia teórica era bastante difícil pues los efectos mensurables era extremadamente débiles, prácticamente indetectables.

> *Los satélites de posicionamiento global que están en uso requieren correcciones de gran precisión que sólo pueden llevarse a cabo con la relatividad general en la mano*

Las ecuaciones 'einstenianas'

Pero después de unas décadas de acumular polvo en un rincón oscuro de la física volvió a ponerse de moda: lentes gravitacionales, universo inflacionario,



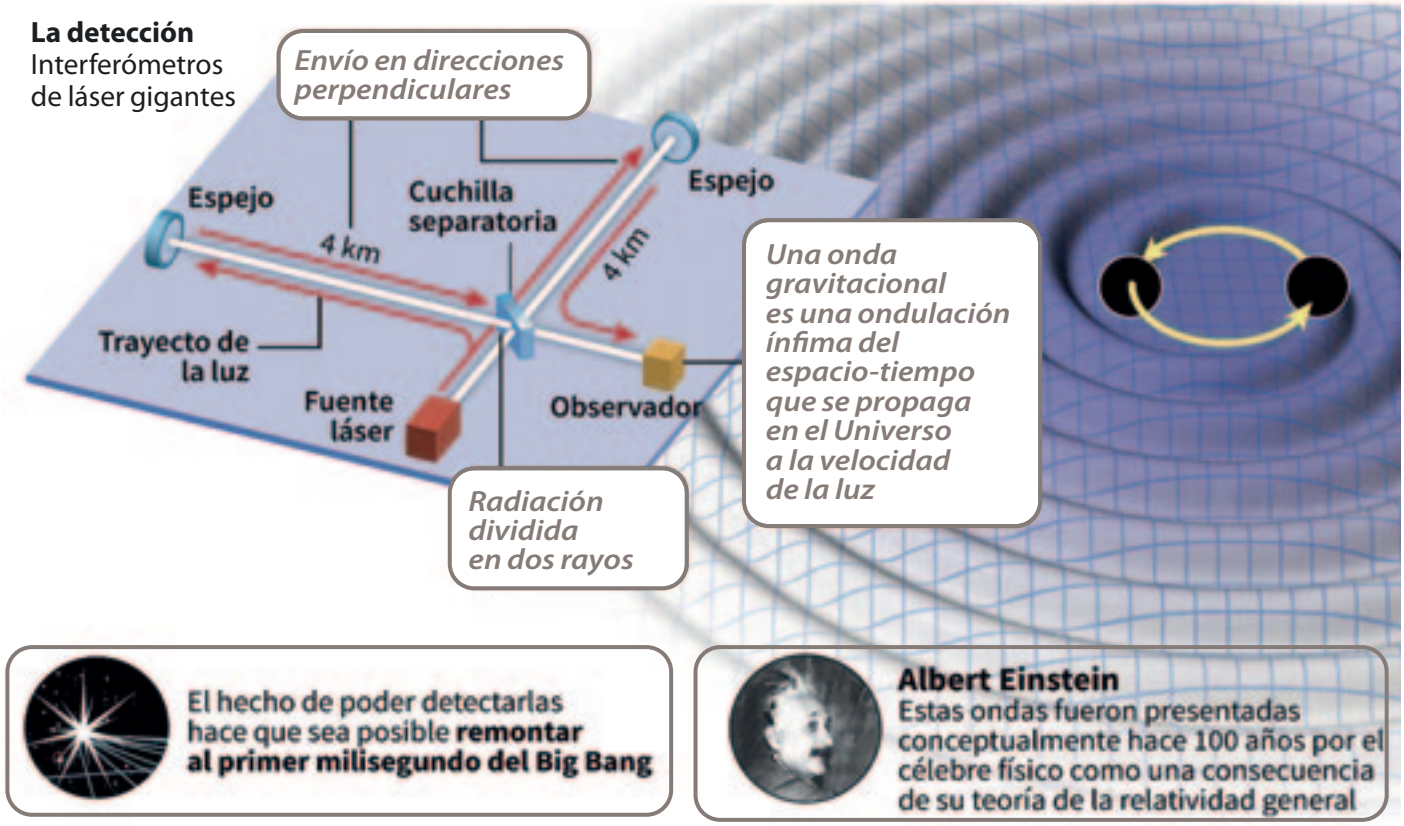
El LIGO de Louisiana (EE UU) dispone de un sistema interferométrico láser de dos brazos perpendiculares y en condiciones de vacío con un recorrido óptico de cuatro kilómetros.

Primera observación directa de ondas gravitacionales

Un avance mayor que abre una ventana hacia en Universo

▶ Ondas detectadas el 14 sep. a las 16h51GMT

▶ Origen: fusión de **2 agujeros negros** hace 1.300 millones de años



El hecho de poder detectarlas hace que sea posible **remontar al primer milisegundo del Big Bang**

Albert Einstein
Estas ondas fueron presentadas conceptualmente hace 100 años por el célebre físico como una consecuencia de su teoría de la relatividad general

púlsares... muchos fenómenos necesitaban de las ecuaciones einstenianas. Como escribieran los físicos Charles Misner, Kip Thorne y John Wheeler en su clásico libro *Gravitation*, "la relatividad general ha dejado de ser el paraíso de los teóricos y el infierno de los experimentales". Incluso hoy en día se la pone de ejemplo de una abstrusa teoría física con implicaciones tecnológicas: los satélites de posicionamiento global que usamos habitualmente requieren correcciones de gran precisión que solo pueden realizarse con la relatividad general en el mano.

Durante todo el siglo XX se han ido comprobando una tras otra todas las predicciones de la teoría: la deflexión que sufre la trayectoria de un rayo de luz al pasar cerca de una estrella fue observada por primera vez en el hoy famoso

Así funciona LIGO

Un rayo láser se dispara contra un divisor de haz, un dispositivo óptico que, como su nombre indica, divide en dos un haz de luz. Cada uno de ellos viaja por cada uno de los brazos de 4 kilómetros en los que se ha hecho el vacío más perfecto posible, se reflejan en un espejo situado al final y regresan hasta interferir en un detector extremadamente sensible. Como ambos haces recorren idéntica trayectoria, la interferencia es destructiva, esto es, no se registra señal alguna en el detector. Ahora bien, si una onda gravitatoria pasa por la Tierra, esto provoca que aparezca una minúscula e imperceptible diferencia en el camino recorrido por los dos haces que hace surgir, casi mágicamente, una señal en el detector.

Sobre el papel todo parece muy sencillo, pero las dificultades técnicas son impresionantes pues la más mínima perturbación puede provocar la aparición de una falsa señal. La sensibilidad de LIGO es impresionante: si los brazos de LIGO llegasen hasta Próxima Centauri, la estrella más cercana a nosotros y situada a 4,24 años-luz, la onda gravitacional los habría encogido la anchura de un cabello humano. Conseguir detectar eso es, en sí mismo, un logro galáctico.

eclipse de 1919 y ha sido corroborada una y otra vez. La más espectacular se realizó con el satélite Hipparcos de la Agencia Europea del Espacio (ESA), que desde 1989 y durante cuatro años estuvo midiendo las posiciones estelares con una precisión sin precedentes: las predicciones teóricas de la relatividad se confirmaron completamente. Uno de los efectos más espectaculares de la deflexión de la luz es el de las lentes gravitacionales: una estrella puede actuar como una lente haciendo que los objetos situados detrás de ella se amplíen e iluminen o se dividan en múltiples imágenes como sucede en los espejos de feria. Pero para Einstein no existía "una gran oportunidad de observar este fenómeno" más allá del Sol, porque es improbable que dos estrellas se encuentran tan exquisitamente alineadas. Lo que no tuvo en cuenta es que este fenómeno podría darse con galaxias o grupos de galaxias, como afirmó el heterodoxo astrónomo Fritz Zwicky en 1937. Varias décadas más tarde, en 1979, se descubría la primera lente gravitatoria por casualidad.

De este modo a finales de los 70 solo quedaba confirmar la existencia de la última predicción de la relatividad general: las ondas gravitatorias. Einstein discutió el concepto de radiación gravitatoria en 1916 al poco de haber desarrollado su teoría, pero cometió un error algebraico que no corrigió hasta 1918.

Las ondas gravitatorias

Para entenderlas, debemos imaginar el espacio-tiempo como algo similar a una cama elástica en la que cualquier movimiento de un objeto astronómico provoca unas leves oscilaciones del mismo modo que nosotros las producimos cuando saltamos sobre la cama. Cualquier objeto del universo es capaz de producirlas: basta con que se mueva y tenga masa. Estas ondulaciones estiran y contraen el espacio-tiempo como el fuelle de un acordeón; se propagan a la velocidad de la luz y si en su camino se tropiezan con otros objetos, como estrellas o planetas, no se detienen sino que pasan a través mientras expanden y contraen el espacio donde se encuentran.

A finales de los años 70 del siglo pasado sólo quedaba confirmar la existencia de la última predicción de la relatividad general enunciada por Einstein: las ondas gravitatorias

Realmente era una consecuencia fascinante de la teoría, pero Einstein sabía que era prácticamente imposible de verificar experimentalmente: si las ondas creadas con la explosión de una supernova en el centro de la Galaxia alcanzaran las hojas de esta revista, el efecto sería tan débil que las estirarían y arrugarían una cienmilésima parte de la billonésima parte de un centímetro, algo que es 100.000 veces inferior al tamaño del núcleo atómico. Algo así de indetectable hizo pensar a muchos científicos que esa predicción era lo que se llama un artefacto, una consecuencia no real, de las ecuaciones de la relatividad. Y así se mantuvieron las cosas hasta finales de la década de 1970, cuando se obtuvo la primera prueba indirecta de su existencia.

Vino de la mano del radioastrónomo Joseph Taylor, un hombre que ya desde su niñez estuvo fascinado por las radiocomunicaciones. Fue el primero en encontrar púlsares después de que Jocelyn Bell, en Cambridge (Inglaterra) los descubriera en 1967. Un púlsar es, en esencia, una estrella de neutrones, un cadáver estelar increíblemente denso: una cucharita de café pesa 900 veces la Gran Pirámide de Keops. Imaginar una estrella de la masa del Sol comprimida en una esfera del tamaño de Madrid y que rota sobre sí misma del orden de mil veces por segundo es realmente complicado, pero este es uno de los destinos que les espera a las estrellas cuya masa es varias veces la solar. En tan extraordinarias condiciones la radiación electromagnética emitida por el púlsar (que son ondas de radio) solo sale en dos direcciones privilegiadas que coinciden con los polos magnéticos de la estrella: se comporta como un radiofaro cósmico. Taylor estaba dispuesto a encontrar más estrellas como ésta y encontro ayuda en un estudiante de postgrado que buscaba un tema pasa su tesis, Russell Hulse.

Desde el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, Hulse localizó 40 nuevos púlsares. Pero había uno que le traía por la calle de la amargura: PRS 1913 + 16, situado a medio camino entre las constelaciones de Águila y Sagitario. Medir el periodo de un púlsar, el ritmo de sus pulsaciones en radio, es algo extremadamente sencillo pues es tan extremadamente regular que puede usarse como su huella dactilar: no hay dos púlsares con dos períodos iguales. Tanto es así que en la placa que llevan adosadas las sondas Pioneer y Voyager anunciando nuestra presencia a posibles civilizaciones extraterrestres, sus creadores, Carl Sagan y Frank Drake, escogieron como sistema de referencia para situar nuestro planeta la posición de 14 púlsares que identificaron por su período de rotación.

El problema con el que se encontró Hulse es que tenía dos mediciones que se diferenciaban en 27 microsegundos, una cantidad enorme para un púlsar. Convencido de que había cometido un error, siguió tomando medidas hasta que al final, hastiado, se planteó que a lo mejor pasaba algo raro con ese púlsar. Al final le vino a la mente algo inconcebible: un

púlsar binario. Con el concurso de Taylor confirmaron que así era: estaban ante dos púlsares que giraban uno alrededor del otro cada 7 horas y 45 minutos. Taylor se dio cuenta de que estaban ante un sistema que le iba a permitir comprobar todo lo que sabíamos de la gravedad. Y así fue. Tras unos años de continuas observaciones, los astrofísicos descubrieron que la órbita de ambos púlsares se iba cerrando: cada vez estaban más cerca uno del otro, siguiendo una órbita en espiral. ¿Por qué era así? La única explicación posible era que el sistema estaba perdiendo energía. ¿Pero, cómo? Sólo podía ser porque emitían ondas gravitatorias. ¿Coindiría lo observado con lo predicho por la relatividad? Comprobarlo era complicado pues era un problema muy difícil y ningún teórico se había planteado hacer los cáculos exactos, así que Taylor echó mano de una aproximación que encontró en un libro de texto clásico de relatividad general. Los cálculos dieron cuenta exactamente de esa contracción de la órbita: las dos estrellas chocarán dentro de 240 millones de años. PRS 1913+16 se había convertido en el sistema perfecto para confirmar la última de las predicciones de la relatividad general. Como dijo Taylor, "es como si hubiéramos diseñado el sistema nosotros mismos y lo hubiéramos puesto ahí solo para hacer este cálculo". Por fin se acababa de demostrar, de forma indirecta, la existencia de las ondas gravitatorias. La pregunta obvia era si se podría encontrar algún día una prueba directa de ellas.

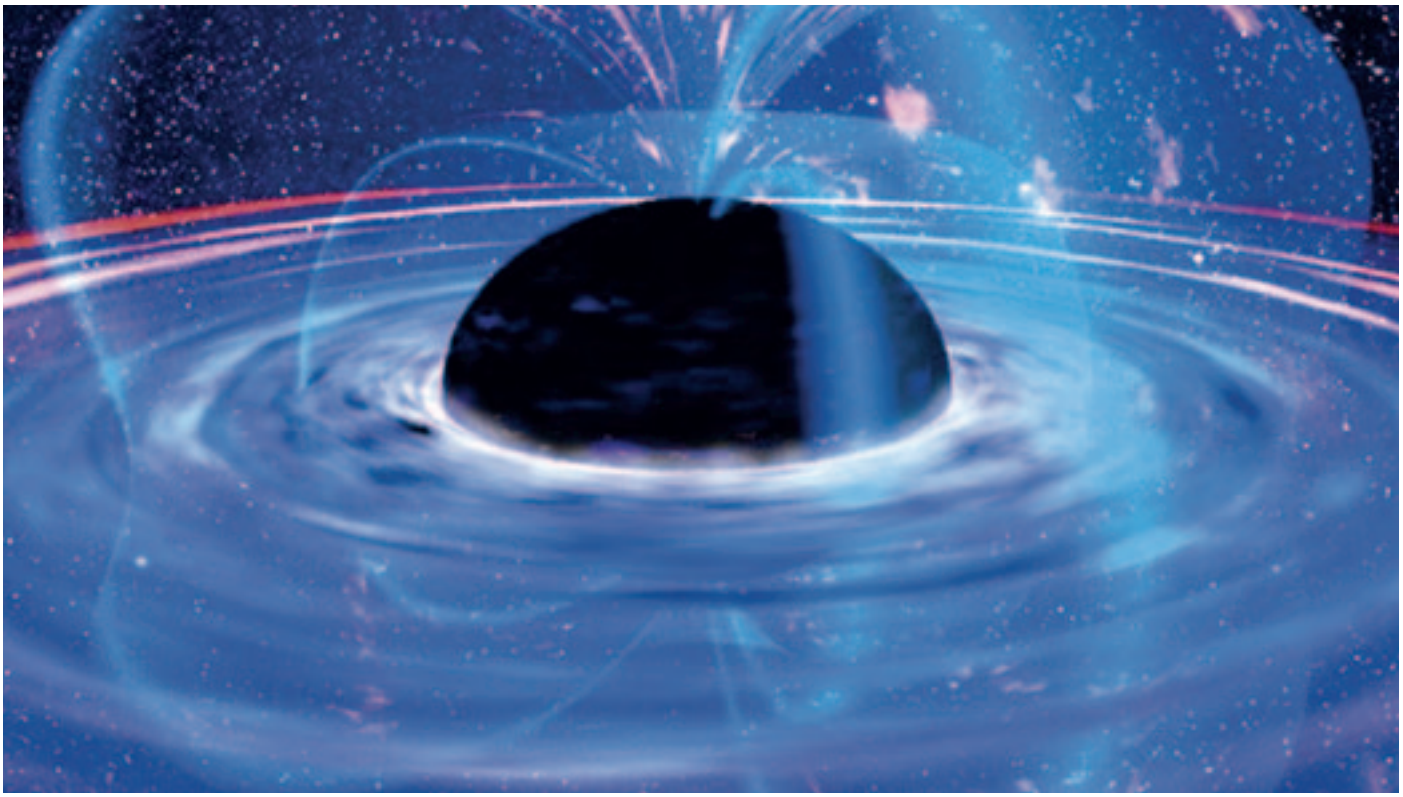
Comienza la caza

La caza había empezado unos años antes de que Taylor y Huse descubrieran PRS 1913+16. En contra de la opinión de toda la comunidad científica un físico llamado Joseph Weber se tiraba a la piscina y diseñaba un experimento destinado a detectar directamente el paso de una onda gravitatoria por nuestro planeta. Nadie en su sano juicio se había atrevido a tanto: alguien calculó que si el Titanic girase a una velocidad de vuelta por segundo generaría menos de una centésima de millonésima de trillonésima de vatio de potencia. Pero Weber hacía caso omiso: pretendía medir el estiramiento que el paso de una onda de tales características provocase en la materia. Y eso era aún más complicado. Imaginémonos el caso más favorable, dos agujeros negros fun-

España, colaborador de LIGO

El Grupo de Relatividad y Gravitación de la Universidad de las Islas Baleares es el único grupo español que pertenece al LIGO Scientific Collaboration (LSC), creado en 1997, y que lo componen más de 1.000 científicos de 15 países. En la rueda de prensa que estos investigadores dieron el día del anuncio, el pasado 16 de febrero, la portavoz del grupo, Alicia Sintes, afirmó estar muy emocionada porque era el "inicio de una nueva era para la astronomía, la era de la astronomía gravitacional".

La participación concreta de este grupo en el descubrimiento se vivió a través del austríaco Sasha Husa, profesor asociado de esta universidad y que lidera junto a Sintes este grupo. Todo empezó cuando en el detector apareció la señal de que 'algo' había pasado. Durante los primeros tres minutos una nube de programas destinados a realizar un análisis rápido empezó a trabajar de forma automática para descartar falsos positivos. Pasado ese tiempo, el sistema lanzó una alerta vía correo electrónico informando que posiblemente había que empezar a poner a enfriar champán. Entre quienes recibió ese mensaje estaba Husa. El análisis estadístico realizado por los científicos del LSC, entre los que se encontraban miembros del grupo español, llegaron a la conclusión de que la probabilidad de haber registrado el paso de una onda gravitacional era del 99,99994%.



Astrofísicos de la NASA lograron detectar la zona donde se encontraban dos agujeros negros cuya colisión dio lugar a la detección de las ondas gravitacionales descubiertas por el Observatorio LIGO.

diéndose en el centro de nuestra Galaxia. Encontrarse en las inmediaciones sería absolutamente destructivo: un astronauta de 1,80 de estatura sería estirado al doble de su altura y encogido una milésima de segundo más tarde hasta 90 centímetros para volver a ser estirado de nuevo y los planetas que pudiera haber en los alrededores se partirían en dos. Pero aquí, a unos cómodos 20.000 años-luz de distancia, sólo sentiríamos un alargamiento de una trillonésima de metro por cada metro.

Pero Weber era un físico inasequible al desaliento y diseñó un dispositivo que publicó en 1960 en las páginas de Physical Review: un cilindro de dos metros de largo por uno de ancho hecho por varias capas de aluminio. Esto implicaba que Weber debía se capaz de medir variaciones en la longitud del cilindro 1.000 veces menores que el diámetro de un protón. Durante muchos años estuvo afirmando que había medido el paso de una onda gravitatoria, pero no pudo convencer a la comunidad científica.

Pero el germen ya estaba en fase de crecimiento. En 1967 Reiner Weiss, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), publicó un estudio donde analizaba una nueva forma de medir el paso de estas ondas: mediante interferometría láser. Su fundamento se encuentra en el concepto de interferencia de la luz, demostrado por el inglés Thomas Young el 24 de noviembre de 1803 en un histórico experimento realizado en la sede de la Royal Society de Londres y que le sirvió para poner las bases de su teoría ondulatoria de la luz. La interferencia es un fenómeno netamente ondulatorio y aparece cuando dos ondas de la misma frecuencia y que se mueven en la misma dirección se superponen formando otra de mayor amplitud.

> *En 1991, el Congreso de los EE.UU. accedió a financiar el LIGO con 23 millones de dólares, pero la subvención se perdió porque no se cumplieron los requisitos para recibirla*

Mientras, el experto en relatividad general del Caltech Kip Thorne calculó en 1968 las intensidades de las ondas gravitatorias emitidas por las posibles fuentes cósmicas y llegó a la conclusión de que podrían detectarse. La conjunción de ambas ideas llevó a la construcción de los primeros proptotipos por el físico y autor de ciencia ficción Robert L. Forward, por Weiss en el MIT y por investigadores europeos en Alemania y Escocia.

En 1980 la National Science Foundation (NSF) financiaba un nuevo estudio

liderado por tres físicos del MIT, Paul Linsay, Peter Saulson y Rainer Weiss, para analizar la posibilidad real, no teórica, de construir un interferómetro láser de dimensiones nunca conocidas: LIGO acababa de nacer. Todo parecía ir viento en popa, pero las dimensiones ciclópeas de un proyecto como ese no está exento de problemas y en la década de los 80 pasó por importantes altibajos: problemas organizativos, dimisiones, reajustes...

El interferómetro parecía que iba a morir antes de haber nacido, a pesar de que estaban embarcados dos de los grandes centros de investigación de Estados Unidos, el MIT y Caltech.

Al final, en 1991 el Congreso accedía a financiar LIGO el primer año con 23 millones de dólares, pero la subvención se perdió porque no se cumplieron los requisitos para recibirla. Para colmo, la NSF cuestionó la viabilidad científica y tecnológica del proyecto, sobretodo en lo que concernía a la sensibilidad de la detección.

Si a todo esto unimos problemas organizativos, LIGO se quedó en el dique seco durante tres años más. En 1994, con nuevos cambios en la cúpula del proyecto, la NSF advirtió al MIT y al Caltech que les daba una última oportunidad para llevarlo a buen puerto. La llegada a la dirección de LIGO de Barry Barish de Caltech fue todo un revulsivo: el rediseño del aparato llevó a que la NSF lo financiara por un total de 395 millones de dólares, la mayor aportación concedida a un proyecto en la historia de la fundación.

Una prueba única

LIGO comenzó a operar en 2002, pero después de 8 años las esquivas ondas se negaban a dejar su huella en el detector. Dispuestos a aumentar su sensibilidad, en 2010 comenzaron a proyectarse nuevas versiones (bautizadas como 'Advanced LIGO') basadas en el detector de ondas gravitatorias que el Max Planck Institute tiene en operación desde 1995 cerca de Hannover. Por fin, después de 5 años de trabajo y con un coste total de 620 millones de dólares, el mejorado LIGO podía ponerse a trabajar: el 18 de septiembre de 2015 entró formalmente en operación.

El futuro

La detección de ondas gravitacionales ha relanzado la moral de quienes llevan dedicados a su caza después de décadas de sequía, como sucede en el detector angloalemán en Hannover o el francoitaliano en Pisa.

Este último volverá a ponerse en funcionamiento este año, después de un lustro cerrado, para mejorar la sensibilidad de su detector y tras operar cuatro años sin una mala señal que llevarse a la boca. Por su parte, los japoneses están construyendo el suyo, KAGRA, y no hay duda que los planes de los responsables de LIGO de abrir un tercer observatorio en la India se verán más que recompensados después de este éxito.

Quien ya ha recogido los frutos es el pequeño grupo español de la Universidad de las Islas Baleares que ha participado en la detección: el pasado 26 de febrero el vicepresidente y consejero de Innovación, Investigación y Turismo del gobierno balear les prometió que destinará más fondos para aumentar el capital humano del grupo. Una excelente noticia para una comunidad autónoma que está a la cola de España y Europa en inversión e innovación.

La mayor instalación del mundo de detección de ondas gravitacionales estaba preparada para cumplir su objetivo: se estimaba que hacia 2021 alcanzaría la sensibilidad esperada, a pesar de que en 2015 ya era cuatro veces mayor que la de su predecesor. Pero lo que nadie se esperaba es que que cuatro días antes de la 'puesta de largo oficial' los nuevos detectores habían registrado el paso de una onda gravitatoria.

Solo fueron 0,2 segundos a las seis menos diez de la mañana del 14 de septiembre. La potencia de lo sucedido no refleja la que realmente se midió en aquella madrugada: los 4 kilómetros de túnel recorridos por el rayo láser en cada uno de los brazos sólo se vio alterado en una milésima de la anchura de un protón.

Semejante nimiedad, casi despreciable, bautizada como GW150914, fue ocasionada por la fusión de dos agujeros negros que en los últimos 20 milisegundos liberó una potencia inimaginable en forma de ondas gravitatorias: 50 veces la radiada por todas las estrellas que existen en nuestro universo observable.

Por suerte, semejante catástrofe cósmica sucedió a 1.300 millones de años-luz de distancia en la dirección de las Nubes de Magallanes, las galaxias satélites a la nuestra que son visibles desde el hemisferio austral. Poco más podemos saber de su localización exacta. Y poco más sabremos de lo sucedido hace 1.300 millones de años, cuando la vida en la Tierra aún seguía dentro del mar y los estromatolitos, esas algas verdeazuladas que todavía hoy podemos ver vivas en Hamelin Pool, Australia, dominaban el planeta.

Ningún neutrino, ningún pico de radiación gamma o rayos X, ni siquiera un tímido destello en el visible o en ondas de radio, nos ha llegado de semejante evento catastrófico: solo esa minúscula señal es la única prueba de que algo inconmensurablemente violento sucedió en nuestro universo.

Javier Dies es la última incorporación al Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Nacido en Lérida, en 1962, es Doctor Ingeniero Industrial. Catedrático de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Cataluña, desde donde ha coordinado el grupo de investigación de ingeniería nuclear, ha sido vicepresidente de la European Nuclear Education Network (ENEN) desde el año 2013. También ha participado y ha sido evaluador en diferentes proyectos de I+D de España y de la Comunidad Europea en materia de ingeniería nuclear. Con una larga experiencia como divulgador, ha participado en distintos medios de comunicación para informar sobre la energía nuclear. Es autor de más de 240 publicaciones científico–tecnológicas, publicadas en revistas internacionales como *Nuclear Science and Technology*, *Journal of Nuclear Materials*, *SNE*, etc. sobre ingeniería nuclear y ha dirigido 12 tesis doctorales sobre la materia. Asimismo, es autor del módulo educativo 'Multimedia de la física de reactores nucleares', de unas 800 páginas, distribuida a más de 88 países y traducida a seis idiomas.

Entrevista a Javier Dies Llovera, consejero del CSN

"El camino es ir hacia la eficiencia reguladora"

Á. Laso D'Iom

Entre 2004 y 2005 fue secretario de la Cátedra Argos de Seguridad Nuclear auspiciada por el CSN y subdirector de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona de 1995 a 2002. Su dilatada trayectoria internacional también le ha llevado a colaborar en 13 misiones de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) para diferentes países como Argentina, Austria, China, Estados Unidos o Vietnam, entre otros.

Sin duda, Dies Llovera, es un experto en el sector nuclear y un gran conocedor del marco de actividad del CSN, además de un veterano conocido de esta 'casa'.

PREGUNTA. ¿Cómo ha sido su aterrizaje en el regulador español de la seguridad nuclear y la protección radiológica?

RESPUESTA. El aterrizaje se está desarrollando muy bien, mis compañeros del Pleno me han facilitado las cosas. Hay un ambiente absolutamente cordial y de respeto, aunque como es normal tengamos puntos de vista distintos y experiencias complementarias. En relación al personal técnico del CSN, cada vez que he necesitado algo o he tenido una reunión con ellos, también me han apoyado mucho, lo que ha supuesto una gran ayuda.

P. Una vez que está conociendo el regulador por dentro, ¿su llegada al CSN ha sido como esperaba?

R. Tenía referencias y había desarrollado varias actividades en colaboración con el CSN. La última ha sido un curso de formación sobre operación de reactores nucleares mediante simulador de central nuclear de 30 horas de duración, de las que yo he impartido 15 a los nuevos técnicos del CSN incorporados en la convocatoria de 2014. Me parece una institución muy rigurosa, donde se han establecido unos procedimientos de regulación sólidos y donde hay una plantilla muy cualificada y profesional. De hecho, el esfuerzo y dedicación de los técnicos del Consejo hace mantener y crecer día a día el prestigio del regulador.

Javier Dies Llovera, nuevo consejero del CSN, es Catedrático de Ingeniería Nuclear y un gran conocedor del marco de actividad del CSN.

P. ¿Qué es lo que más le ha le ha llamado la atención del CSN frente al mundo académico del que usted proviene?

R. Al llegar al CSN me han ido mostrando que la actividad que debe realizar un consejero se podría resumir en una actividad similar a la que debe realizar un juez pero, en este caso, juzgando temas relativos a la seguridad nuclear y a la protección radiológica. Reflexionando sobre esta idea, me he dado cuenta de que en mis 30 años como profesor de universidad, en numerosas ocasiones ya había tenido también que actuar como un juez sobre temas de ingeniería nuclear. Por ejemplo, decidiendo qué estudiantes de Ingeniería podían aprobar la asignatura de reactores nucleares, pues unos aprobaban y otros no. O eligiendo qué candidatos eran habilitados para plazas de profesores titulares de universidad en ingeniería nuclear, sobre qué profesores eran acreditados para plazas de profesores titulares de universidad o catedráticos en el programa ACADEMIA. Por supuesto, también decidiendo qué profesores obtenían la plaza de catedrático de universidad en ingeniería nuclear en universidades de otros países o hasta elegir de entre un grupo de 30 proyectos de investigación sabiendo que solo los 15 primeros serían financiados por la Comisión Europea en el programa NUGENIA. Además, he sido evaluador de artículos en revistas internacionales sobre ingeniería nuclear, donde algunos artículos eran aceptados y otros rechazados. Se trata de ejemplos sencillos, en los que se debe hacer una cierta labor de juez como la que hacemos los consejeros del CSN y para la que, indudablemente, se requiere: independencia, competencia, transparencia y rigor.

P. ¿Considera que su llegada al regulador pueda frenar su labor divulgativa, dado que es autor de más de 240 publicaciones y artículos en revistas internacionales como *Nuclear Science and Technology*, *Journal of Nuclear Materials*, *SNE*, etc. sobre ingeniería nuclear?

R. Aunque la temática sobre la que trabajo ahora en cierto modo sigue siendo la misma, la ingeniería nuclear y la seguridad nuclear, mi deber en estos momentos no es hacer investigación y publicar artículos. Ahora me toca realizar otro papel, trabajar como consejero del CSN y profundizar en los temas de seguridad nuclear y protección radiológica desde el punto de vista regulador y eso es una labor distinta, pero muy interesante. Quiero ponerme a disposición de todo el CSN para ayudar. Quiero poner la máxima dedicación a esta nueva responsabilidad y tratar de aportar mi granito de arena a esta prestigiosa e importante institución que es el Consejo de Seguridad Nuclear.

P. ¿Qué fortalezas ve en el Consejo de Seguridad Nuclear que cree que habría que destacar y cuáles son los aspectos de mejora?

R. Como he indicado antes, el CSN cuenta con un personal técnico muy profesional, de gran prestigio internacional y con un elevado conjunto de procedimientos establecidos que dan una gran solidez a la institución. Pero no debemos conformarnos, aquí la exigencia debe ser diaria, y siempre debemos estar en actitud de revisar y mejorar, en alerta permanente. Un ejemplo de lo que hablo: el CSN va a realizar un ejercicio de evaluación de su actividad en global mediante una evaluación internacional llamada *Integrated Regulatory Review Service* (IRRS), que impulsa el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Se trata de unas misiones en las que participan unos 22 expertos internacionales que, durante dos semanas, visitarán el CSN y algunas de las instalaciones reguladas. Está previsto que esta misión se realice en 2018 y sin duda será otra gran oportunidad más para mejorar. El camino es ir hacia la eficiencia reguladora. Es importante saber encontrar un equilibrio y no llegar a la sobrerregulación en estos procesos de mejora y para ello resultan enriquecedoras las palabras del presidente del organismo regulador americano (USNRC) S. G. Burns, pronunciadas el pasado 8 de marzo de 2016 en la Regulatory Information Conference (RIC-2016) en Washington, que para preservar su preciso significado prefiero no traducir: *"I argue that the regulator needs to constatly pursue the "sweet spot" between regulation, good regulation, and over regulation, to pursue effective regulations, without imposing undue burden and stifling innovation"*.

> *"El CSN es una institución muy rigurosa, donde se han establecido unos procedimientos de regulación sólidos y donde hay una plantilla muy cualificada y profesional. De hecho, el esfuerzo y dedicación de sus técnicos hace mantener y crecer día a día el prestigio del regulador"*

P. Se ha cumplido el quinto aniversario del accidente ocurrido en Fukushima. ¿Qué cambios destacaría en la regulación internacional y en la española?

R. Una de las actividades que he empezado a realizar como consejero es visitar todas las centrales nucleares españolas. La primera de ellas ha sido la central nuclear de Almaraz. En esa visita he podido comprobar con mis propios ojos, como una parte muy importante de la medidas derivadas de Fukushima han sido implementadas. Dado que la central estaba en el proceso periódico de recarga de combustible, tuve la oportunidad de entrar en el edificio de contención. También en los edificios de combustible, turbina, sala de control, etc. Intuitivamente creo, que si realizamos ahora un análisis probabilístico de seguridad de la central nuclear de Almaraz, y calculamos la frecuencia de daño al núcleo, la frecuencia de daño al combustible en la piscina de combustible gastado y la frecuencia esperada de una liberación temprana significativa, observaremos que estos tres parámetros han disminuido respecto al valor que tenían el primer año de funcionamiento de la central nuclear. Por tanto, eso es una manera objetiva de decir que la central nuclear es más segura ahora que el primer año de funcionamiento. Sin duda, este razonamiento puede aplicarse a todas las centrales nucleares españolas.

P. Usted es un experto en el sector y un gran conocedor del mismo en todo el mundo, ya que ha colaborado en 13 misiones del OIEA para diferentes países como Argentina, Austria, China, Estados Unidos o Vietnam, entre otros. Por ello, ¿qué diferencias encuentra entre las distintas culturas de seguridad y de regulación en el panorama internacional en estos momentos?

R. España siempre ha tenido una tendencia a seguir el modelo regulador estadounidense ya que la mayoría de sus centrales nucleares son de esa tecnología. No obstante, como miembro de la Unión Europea, participa en WENRA y en ENSREG y ha introducido algunas de las tendencias reguladoras europeas en el sistema español. Finalmente, la participación en las reuniones de la Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)como son las del CSS (Committee on Safety Standards) también ha permitido pasar por ese tamiz global el siste-

Como experto, Dies Llovera ha participado en 13 misiones internacionales del OIEA.

ma español. Por tanto, creo que España se alimenta de los progresos en regulación nuclear tanto de Estados Unidos como de Europa y el OIEA y eso es muy bueno para el desempeño de nuestra actividad.

P. En estos momentos, ¿qué destacaría del panorama internacional de la regulación nuclear y, por consiguiente, de la seguridad nuclear y la protección radiológica?

R. Del 8 al 10 de marzo pasado he asistido en Washington (EE.UU.) a la *Regulatory Information Conference* (RIC-2016) organizada por el organismo regulador americano (USNRC). Hubo una sesión técnica dedicada a la renovación de licencias, *(T23 Subsequent License Renewal),* donde un representante del organismo regulador americano, un representante de la industria nuclear, y un representante del gobierno (*Department Of Energy,* DOE), explicaron durante unas dos horas, la posición que tienen sobre la regulación de la operación de las centrales nucleares cuando se alcance los 60 años para llegar a los 80 años. El resumen de esa sesión sería que, para 2017, la NRC tendrá lista la normativa que regulará el proceso de renovación de licencias para periodos de 60 a 80 años ya que se espera que para 2019 una central nuclear estadounidense presente la documentación para obtener esta nueva licencia de operación con el compromiso de la NRC de que, entre 2021 y 2022, dé la resolución a esa primera solicitud. Es obvio que esto es una referencia importante a nivel internacional en los procesos de regulación y una de las actividades más novedosas.

P. Ha dirigido una de las cátedras (Argos) en las que participa el CSN. ¿Cree que este es suficiente enlace entre el regulador y la universidad o puede y debe ampliarse?

R. Creo que las cuatro cátedras que tiene el CSN son un instrumento positivo de colaboración entre la universidad y el organismo regulador. Como se ha indicado anteriormente, he participado en trece misiones del OIEA, en general sobre recursos humanos para el desarrollo del programa nuclear del país o continente que acoge la misión. En esas misiones, he tenido que hacer alguna presentación sobre buenas prácticas en ese campo y, en la mayoría, he citado las cátedras del CSN como un claro ejemplo de colaboración, para que pueda ser una referencia para otros países. Una manera de mejorar la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas de un país, es sin duda incorporar en toda la cadena del sector como ingenierías, centrales nucleares, empresas eléctricas y organismo regulador a los técnicos lo mejor preparados posibles, y allí las universidades con programas de formación en ingeniería nuclear o protección radiológica, realizan una contribución muy significativa.

“En EE.UU. hay 83 centrales nucleares con licencia de operación hasta los 60 años y 11 más están en proceso de evaluación por la NRC”

PREGUNTA. ¿Qué opina sobre los asuntos en los que trabaja actualmente el CSN que están resultando más polémicos, como es el caso de la solicitud de renovación para operar la central nuclear Santa María de Garoña?

RESPUESTA. Se trata de dos temas importantes. Para abordarlos primero deberíamos analizar el contexto de las centrales nucleares en el mundo. Este contexto se puede resumir recopilando la situación de cada uno de los países del mundo. No debemos fijarnos solo en la posición de China, ni tampoco solo en la posición de Alemania. El resultado global es el siguiente, en el mundo hay: 442 centrales nucleares operables, 66 centrales nucleares en construcción, 158 centrales nucleares compradas o planeadas y 330 centrales nucleares propuestas. Respecto a la renovación de licencia de estas instalaciones en el contexto internacional, puede ilustrarse indicando que en Estados Unidos hay ya 83 centrales nucleares que han obtenido licencia de operación hasta los 60 años y 11 centrales más están en proceso de evaluación por la NRC. Otros países como Suiza, Suecia, Rusia, Holanda, Japón, Finlandia, Canadá o Bélgica tienen también centrales nucleares con licencias de operación aprobadas más allá de los 40 años. Por tanto, el proceso en curso con la central nuclear de Garoña, al margen de su resultado final, está ampliamente sustentado por una experiencia tecnológica y reguladora a nivel internacional. Al margen de estos datos, mi opinión centrada en la actividad del organismo regulador, es que el proceso de renovación de la licencia de la central nuclear de Garoña, al igual que el resto de centrales nucleares, debe seguir el mismo proceso que se ha realizado hasta la fecha con todas las centrales nucleares españolas, con las respectivas mejoras propias de todo proceso regulador.

P. ¿Y sobre el licenciamiento del futuro Almacén Temporal Centralizado (ATC)?

R. Respecto al ATC, el Pleno del CSN en 2006 dio apreciación favorable al diseño genérico del ATC y ya ha otorgado con condiciones el pasado año la licencia al emplazamiento. No obstante, los técnicos del CSN siguen trabajando en estos momentos en este asunto. Sin embargo, me gustaría recordar que el ATC es un proyecto de Estado y que el proceso para su desarrollo fue aprobado en el Congreso de los Diputados, prácticamente por unanimidad, excepto IU. El CSN es el encargado de velar por la seguridad nuclear en España, y el ATC representaría una mejora significativa en la seguridad relativa al confinamiento del combustible irradiado de las centrales nucleares españolas y representaría una mejora en la seguridad de todos los ciudadanos españoles así como una mejora en la protección del medio ambiente.

P. ¿Qué cree que aportan las cátedras del CSN?

R. Desde mi punto de vista pueden realizar dos claros objetivos, por un lado incentivar la formación entorno a la ingeniería nuclear y la protección radiológica y, por otro, incentivar la investigación en temas afines a la actividad del CSN. Actualmente con los nuevos planes de estudio, tres de las universidades que tienen cátedras con el CSN han logrado crear másteres entorno a la ingeniería nuclear o protección radiológica. Además, las cátedras pueden ayudar a atraer más estudiantes a estos másteres, que siempre están bajo la amenaza, de que si el número de estudiantes disminuye pueden ser cancelados, dado que la normativa de la universidad requiere un mínimo número de matriculados para mantener vivo un máster. O considerar ese máster estratégico dado su temática. Hay que añadir que, además de las cátedras, el CSN realiza convenios de colaboración con universidades para impulsar temas específicos de investigación. A estos dos tipos de acciones de colaboración entre el CSN y la universidad a mi modo de entender, se podría añadir acciones orientadas a incrementar el número y calidad de recursos humanos en el campo de la seguridad nuclear y protección radiológica en España. Por ejemplo se podría establecer un programa de mejora del equipamiento formativo en estas universidades, incluyendo la adquisición o actualización de simuladores de centrales nucleares para formación, dispositivos experimentales de educación en ingeniería nuclear, etc.

P. Usted también es un experto en Investigación y Desarrollo ¿Qué vías de colaboración ve posibles para ampliar estas actividades en relación con el CSN?

R. Por un lado están las cátedras del CSN y, además, están los convenios de colaboración específicos para realizar proyectos de

El Consejero tiene previsto visitar todas las centrales nucleares nacionales españolas. La primera ha sido, recientemente, la de Almaraz.

investigación. Sin duda sería muy positivo que estos proyectos de investigación se pudieran incrementar en cuanto a número y presupuesto, siempre que se garantizase que estén centrados en temas relevantes para la seguridad nuclear y la protección radiológica. Actualmente, el CSN, una vez que están terminados los proyectos de investigación, realiza una evaluación externa de los mismos mediante una colaboración con la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva (ANEP).

P. Se están produciendo numerosas jubilaciones en el CSN y, aunque hay algunas incorporaciones nuevas y otras en cartera, ¿considera que la transmisión del conocimiento va a ser una de las políticas más necesarias a medio plazo en organizaciones tan específicamente técnicas como el CSN?

R. Sobre esta materia, creo que hay que felicitar a mis compañeros del Pleno, porque han realizado un trabajo muy importante y han logrado realizar un programa de convocatoria de nuevas plazas. Tras la convocatoria de plazas de 2014 se han incorporado seis personas, en la de 2015 se está terminando el proceso para 19 personas, y para 2016 acaban de ser aprobadas seis nuevas plazas más. Para 2017 y 2018 esperamos alcanzar cifras parecidas. Con estos números se está consiguiendo reemplazar prácticamente la totalidad de las jubilaciones de la casa y eso es un gran éxito. Ahora queda la tarea de realizar la transferencia de conocimiento a las nuevas incorporaciones, un proceso muy laborioso, que puede requerir cuatro o cinco años. Además, el CSN también dispone de un plan de formación interesante que se ajustará a las nuevas incorporaciones.

> *"Creo que España se alimenta de los progresos en regulación nuclear tanto de Estados Unidos como de Europa y la IAEA y eso es muy bueno para el desempeño de nuestra actividad"*

P. ¿Cómo se refuerzan los estándares de independencia y transparencia que ha alcanzado el CSN? ¿Qué trabajo queda por hacer?

R. Una forma de reforzar los estándares es mantener y aumentar la competencia del personal técnico del CSN. En cuanto la transparencia, se ha realizado una mejora de la *web* del CSN, para que sea más amigable y completa; en ella se recoge una cantidad muy importante de información relativa al progreso de las actividades que realizada el CSN en el campo de la seguridad nuclear y la protección radiológica. Por ejemplo, se publican todas las actas del Pleno y, todos los votos particulares de los consejeros. Hay un sistema muy exhaustivo de comunicar los sucesos que tienen lugar en las centrales nucleares e instalaciones radiactivas. Hay que tener presente que una gran parte de las instalaciones radiactivas corresponden a las aplicaciones médicas ya que los hospitales son grandes usuarios de las técnicas radiactivas.

Ionizando con radiación no ionizante

El láser de Petavatio de Salamanca

En el Centro de Láseres Pulsados (CLPU) de Salamanca está instalado el Láser VEGA, un láser pulsado con pulsos de 30 femtosegundos de duración, capaz de llegar al petavatio de potencia pico, lo que le convierte en uno de los láseres más potentes del mundo. Cuando se focaliza, ese láser puede llegar a intensidades extremas. Cómo interacciona un átomo con un pulso así o para qué sirve, son algunas de las preguntas que intentamos responder. Por otro lado, ese láser es infrarrojo (en torno a los 800 nanómetros de longitud de onda) y debería ser considerado como radiación no ionizante, sin embargo ioniza, y ¡cómo ioniza! No sólo arranca los electrones en cuestión de femtosegundos, sino que los acelera a velocidades relativistas. Esos láseres se están consolidando como el nuevo paradigma en aceleración de partículas, entre otras cosas.

Texto **Luis Roso Franco** | Catedrático de Física de la Universidad de Salamanca y Director del Centro de Láseres Pulsados, CLPU |

El primer láser fue construido por Theodore Maiman en 1960. Desde entonces los láseres se han ido desarrollado y especializando. Una de esas especializaciones son los láseres pulsados ultracortos ultraintensos. Hoy en día es posible, y relativamente sencillo, generar pulsos láser de pocos femtosegundos de duración. Los sistemas más habituales están en el infrarrojo cercano al visible. Estos sistemas se pueden amplificar hasta límites extraordinarios gracias a una técnica denominada *Chirped Pulse Amplification* (CPA) que consiste en estirar un pulso aprovechando que los pulsos cortos son de banda ancha, amplificarlo mientras está estirado (y por tanto mientras su energía está repartida en el tiempo) y luego re-comprimirlo hasta la duración inicial.

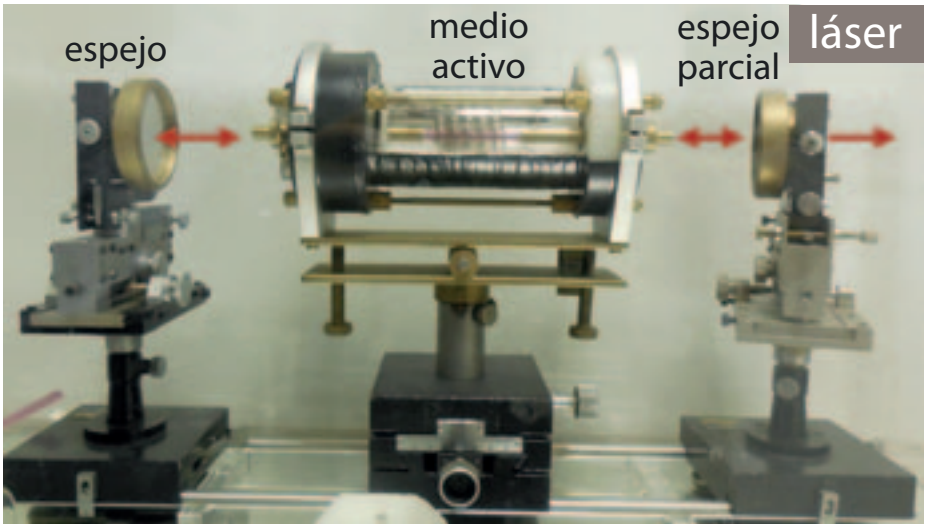
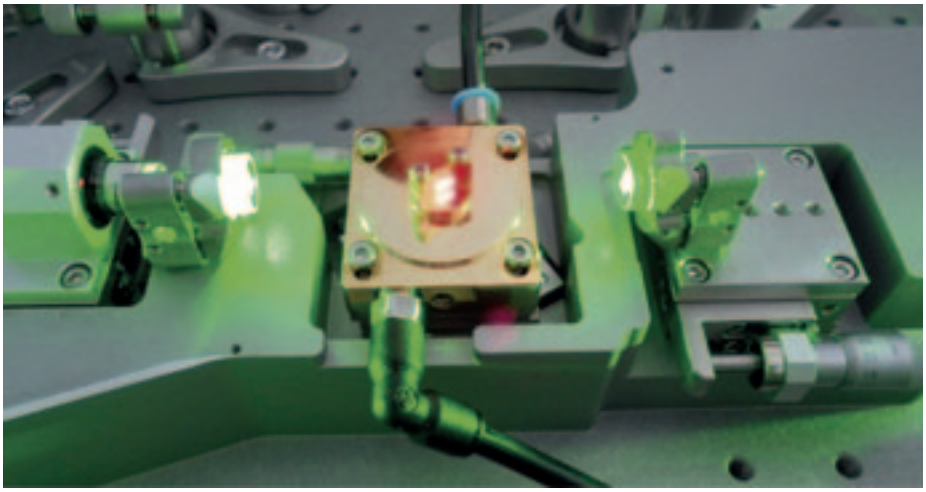


Imagen del primer láser realizado en Italia, en el Politécnico de Milán, muy similar al láser original de Maiman. Es un láser de Rubí. Ahora es sólo una pieza de museo.

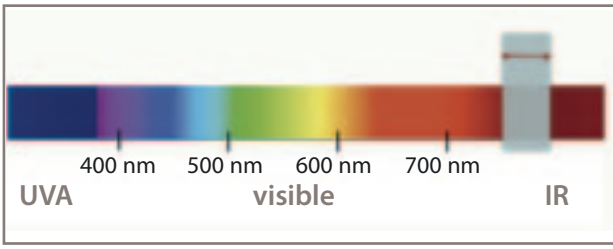
En Salamanca, hay un centro especializado en estos láseres extremos, el CLPU, Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos, un nombre perfectamente descriptivo de lo que es. El CLPU es la Infraestructura Científico Técnica Singular (ICTS) Española especializada en láseres ultrapotentes. Es un consorcio público entre el Ministerio de Economía y Competitividad, la Junta de Castilla y León y la Universidad de Salamanca. En el CLPU hay algunos sistemas CPA menores con potencias pico de gigavatio, además del láser VEGA, uno de los láseres más potentes y avanzados del mundo. VEGA es un láser de titanio:zafiro, el medio activo es titanio que está actuando como dopaje de un cristal de zafiro sintético. Detalles aparte, es un láser infrarrojo que emite en torno a los 800 nanómetros de longitud de onda. Decimos en torno a esa longitud de onda pues al ser pulsos tan cortos (30 femtosegundos) tienen un ancho de banda muy apreciable (unos 30 nanómetros). Eso quiere decir que se emiten de forma coherente y simultánea una entre 770 y 830 nanómetros

Vista general de los amplificadores del láser VEGA de Salamanca, uno de los láseres más avanzados del mundo.

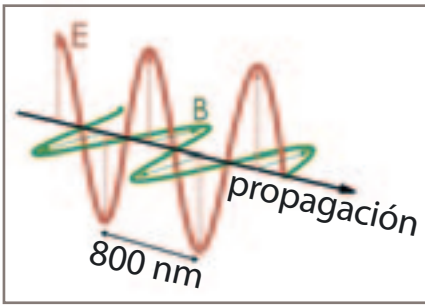
(no es un láser monocromático, pero es un láser, es decir, es luz coherente). Por darnos una imagen clara, 30 femtosegundos es el tiempo que tarda la luz en recorrer 10 micras. Para poder amplificar a esos extremos, sin destruir la óptica a cada disparo, se necesitan haces relativamente grandes. El haz final del petavatio de salamanca tiene 24 centímetros de diámetro (no es un rayo láser como el de un puntero láser; es un disco de luz de 10 micras de espesor, 24 centímetros de diámetro que solo puede propagarse en alto vacío) y la óptica empleada en el compresor implica redes de



Un oscilador de titanio-zafiro de femtosegundos. La luz verde es el bombeo (es un laser de banda ancha bombeado or un láser más convencional). La fluorescencia roja del titanio:zafiro se observa en la imagen.



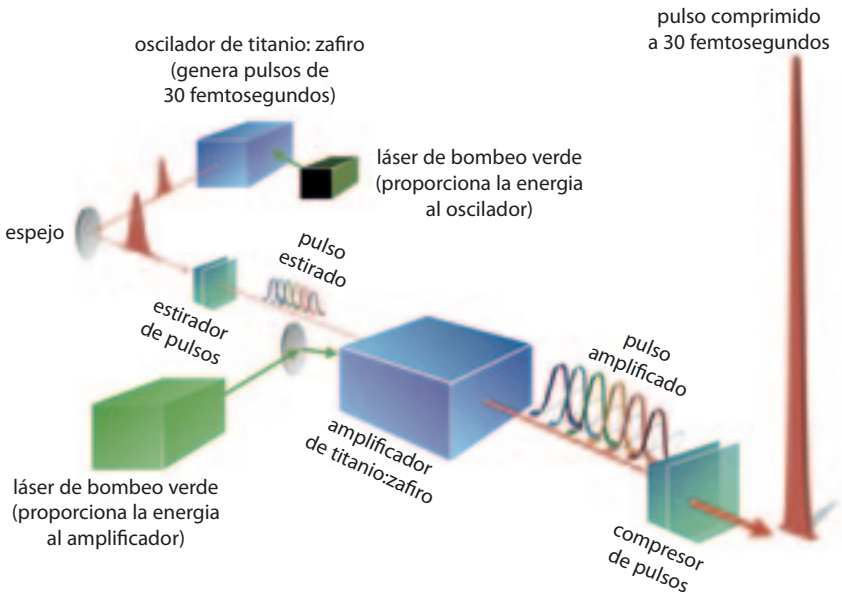
ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. El láser de titanio-zafiro de femtosegundos es un láser que emite simultánea y coherentemente en una banda de frecuencias (rectángulo gris) que esta en el infrarrojo cercano.



ONDA ELECTROMAGNÉTICA POLARIZADA LINEALMENTE. En vacío el campo eléctrico (E) y el magnético (B) son siempre perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de propagación. En nuestro caso, se trata de un láser infrarrojo de alrededor de 800 nanómetros de longitud de inda. A las intensidades extremas en las que se trabaja en Salamanca tanto el campo eléctrico como el magnético son muy relevantes.

difracción de más de medio metro de anchura.

Petavatio puede impresionar (la red eléctrica española son 50 gigavatios). Sin embargo, lo que marca la interacción con la materia es la intensidad, la capacidad que tenemos, al ser coherente, de concentrar ese disco de luz –focalizar– en un volumen de digamos 10 micras de radio y las 10 de espesor que ya tenía. Cuando ponemos energías de decenas de julios en volúmenes de micras, es cuando tenemos una concentración brutal –otra palabra no se aplica– de



ESQUEMA DE LOS ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA LÁSER CPA (Chirped Pulse Amplification) como el láser VEGA de Salamanca.

energía. Un láser de gigavatio se puede enfocar por encima de los 10^{16} W/cm^2 en aire y uno de petavatio por encima de los 10^{20} W/cm^2, o incluso 10^{22} W/cm^2, pero eso ya debe de hacerse en alto vacío (obsérvese que la unidad que empleamos es energía/tiempo/superficie, ya que es la mejor forma de apreciar como concentramos la energía en espacio-tiempo). Eso es un valor realmente extremo, por ello los láseres extremos han marcado un cambio radical en nuestra evolución de la interacción luz-materia. Obsérvese que los W/cm^2, vatios divididos por centímetro cuadrado, son una unidad un poco extraña, pues debería ser en el Sistema Internacional vatios divididos por metro cuadrado. Sin embargo, la comunidad de láseres intensos ha adoptado esa unidad.

La fotoionización

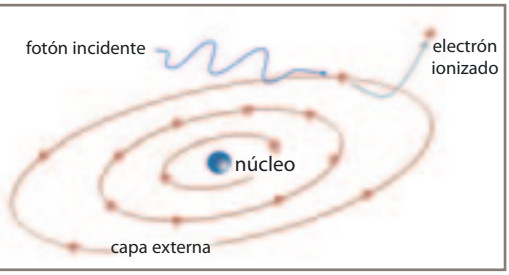
Quizás el efecto fotoeléctrico se considere como el concepto más fundamental de interacción entre luz y materia, a pesar de que hace ya más de un siglo que se observó y explicó. Se vio que si la luz no llegaba a un umbral de frecuencia no ionizaba absolutamente nada y si era de mayor frecuencia que este umbral, entonces sí ionizaba.

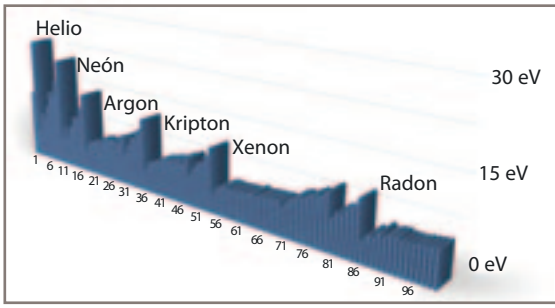
Con las fuentes disponibles a principios del siglo pasado, la presencia de este umbral era independiente de la intensidad de la luz. Para arrancar un electrón es necesario, pues, tener un fotón que le proporcione la energía necesaria para liberarlo de la atracción de su núcleo. Hoy en día se han medido estas energías y se sabe que el cesio es el elemento de la tabla periódica que tiene la energía de ionización menor, solamente 3,9 electronvoltios, lo que corresponde a una longitud de onda de 319 nanómetros (ultravioleta cercano). Eso se debe a que es el alcalino de mayor peso atómico. En el otro extremo de energías de ionización encontramos al helio (24.6 electronvoltios). El helio tiene sus dos electrones en la capa K –la más interna– y por este motivo arrancar uno de ellos es muy difícil.

Por todo lo indicado, el criterio comúnmente aceptado de considerar radiación ionizante por debajo de los 100 nanómetros de longitud de onda, es decir, para energías de los fotones por encima de los 12.4 electronvoltios es muy razonable (pero exclusivamente para fuentes de baja intensidad). La legislación española define como radiación ionizante aquella radiación electromagnética cuya longitud de onda que queda por debajo de los 100 nanómetros (esa longitud de onda corresponde al ultravioleta de vacío).

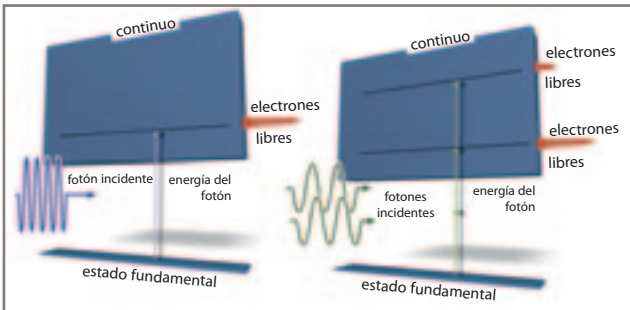
Concretamente, en el Boletín Oficial del Estado Español del jueves 26 de julio del 2001, define "Radiación ionizante: transferencia de energía en forma de partículas u ondas electromagnéticas de una longitud de onda igual o inferior a 100 nanómetros o una frecuencia igual

LA FOTOIONIZACIÓN consiste en arrancar un electrón de un átomo mediante un fotón o varios.



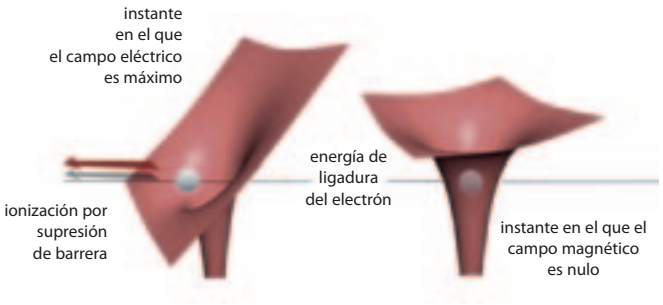


ENERGÍAS DE IONIZACIÓN de los diferentes elementos de la tabla periódica. El láser de titanio-zafiro (fotones en torno a 1.5 eV) no debería ser capaz de ionizar ningún elemento, sin embargo por encima de cierta intensidad esa afirmación deja de ser cierta.



COMPARACIÓN entre la ionización einsteniana a un fotón y la ionización a dos o más fotones.

REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA IONIZACIÓN POR SUPRESIÓN DE BARRERA. El potencial coulombiano (derecha) se inclina por efecto del campo eléctrico brutal del láser (izquierda). La barrera de potencial desaparece durante una fracción de tiempo (del orden de femtosegundo) lo que aprovecha el electrón para –literalmente– escapar del núcleo que lo tenía atrapado.



o superior a 3 x 10^{15} hertzios, capaces de producir iones directa o indirectamente". A nuestro conocimiento, la definición de radiación ionizante sigue vigente a la fecha y, además, esta definición ha sido adoptada subsidiariamente en legislaciones regionales y locales.

Efectos multifotónicos

Hasta ahora nos hemos limitado a considerar que un electrón absorbe un fotón. Mejor dicho, que un átomo absorbe un fotón y la energía del fotón pasa al electrón ligado y se emplea para promoverlo a un estado libre. Si el fotón no tiene energía suficiente, el electrón no puede ionizarse. Esto ha sido la única situación físicamente posible hasta que han llegado fuentes de luz suficientemente intensas, los láseres.

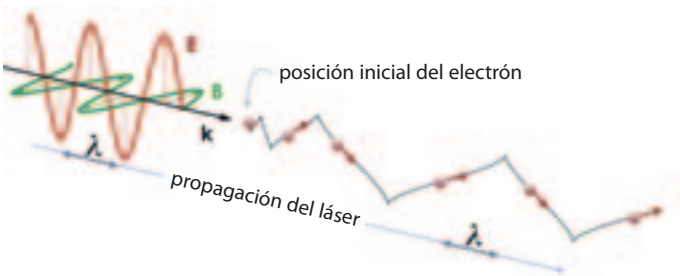
Si un fotón no tiene la energía necesaria, entonces ¿por qué no se absorben dos, o más? La respuesta es muy sencilla. Eso es posible siempre que la fuente de fotones sea suficientemente intensa. Así empiezan los efectos multifotónicos. Siguiendo con el razonamiento basado en fotones, si éstos no tienen suficiente energía para superar el umbral de ionización igualmente pueden ionizar, pero mediante procesos a dos o más fotones. Entonces, si la suma de las energías de los dos fotones excede la energía de ligadura, el exceso de energía será la energía cinética del electrón emitido.

> *La idea de procesos a dos fotones se debe a Maria Göppert-Mayer. Su trabajo de 1931 fue tan avanzado a su época que no se pudo apreciar en todo su potencial hasta que llegaron los láseres*

Esta se podría considerar como la primera modificación seria al efecto fotoeléctrico einsteniano. La idea de procesos a dos fotones se debe a Maria Göppert-Mayer. Su trabajo de 1931 fue tan avanzado a su época que no se pudo apreciar en todo su potencial hasta que llegaron los láseres y debe de ser considerada como la iniciadora de la teoría multifotónica, algo que muchas veces no se reconoce. Influyó en eso que fuese una autora y no un autor, o fue simplemente la sombra de Einstein... Lo cierto es que aún ahora se considera que el efecto fotoeléctrico es un efecto válido para cualquier intensidad.

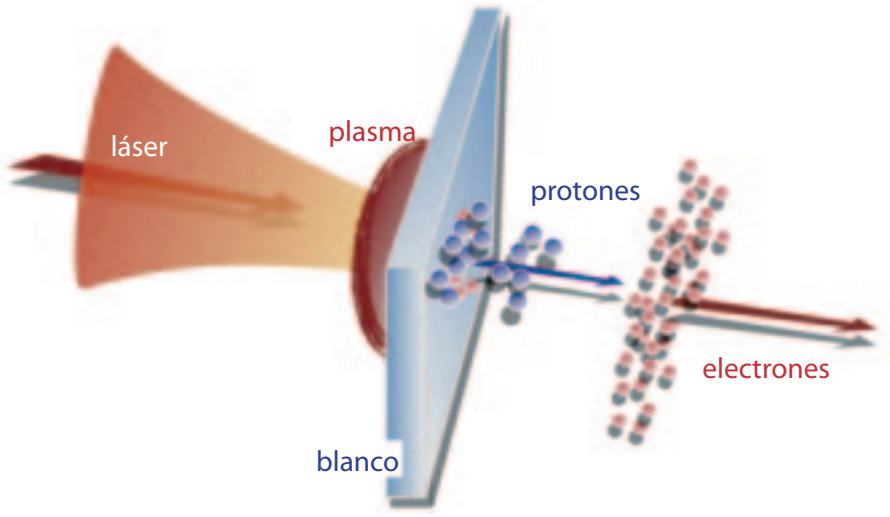
Cuando consideramos intensidades por encima de los 10^{16} W/cm^2, todos esos conceptos pierden su razón de ser. El campo eléctrico del láser es tan enormemente intenso que ya no podemos hablar de fotones individuales sino de efectos de campo. Ahí aparece un nuevo concepto, la ionización por supresión de barrera. La barrera coulombiana que liga un electrón atómico con su núcleo queda anulada en una dirección

TRAYECTORIA DE UN ELECTRÓN EN UN LÁSER LINEALMENTE POLARIZADO. El dibujo corresponde a la solución numérica para 10^{19} W/cm^2 y 800 nanómetros de longitud de onda. Debido a la dinámica relativista, el movimiento del electrón es más complejo que una simple oscilación.



por el efecto del campo eléctrico. Es como si el electrón estuviese en una jaula y de golpe le abrimos la puerta, se ioniza inmediatamente. La ionización por supresión de la barrera coulombiana sucede en pocos femtosegundos (dos o tres) así que el campo eléctrico del láser es lo suficientemente intenso (por encima de los 10^{15} W/cm^2).

La ionización por supresión de barrera es el efecto dominante por encima de los 10^{16} W/cm^2. Se genera en escasos femtosegundos un paquete de electrones muy compacto. Tanto que se está seriamente considerando este efecto para inyectores de electrones en los aceleradores. Pero esa intensidad es relativamente moderada hoy en día, se puede subir al menos seis órdenes de magnitud más. A la fecha el récord mundial está por los 10^{22} W/cm^2 (no se sabe exactamente, por las propias dificultades que implica medir con precisión una intensidad tan extrema). ¿Qué fenomenología tenemos en esa zona extrema? Vayamos poco a poco.



REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS EFECTOS DE PLASMA. Cuando el láser incide sobre una diana muy fina (micras) ioniza electrones y los acelera a velocidades relativistas. Esos electrones forman una especie de condensador efímero que arrastra a partículas positivas (protones, iones).

Partícula cargada en el seno de una onda electromagnética

El láser ejercerá una fuerza sobre cualquier partícula cargada (un electrón o un protón). A intensidades por encima de los 10^{18} W/cm^2 (para un láser en el infrarrojo cercano) el movimiento de los electrones (que se puede calcular fácilmente a partir de la expresión de la fuerza de Lorentz). La fuerza es directamente proporcional a la carga y la aceleración producida inversamente proporcional a la masa. Como electrones y protones tienen la misma carga (en valor, con signos diferentes, obviamente) y masas muy diferentes, el resultado es que los electrones se aceleran mucho más que los protones. El movimiento es oscilatorio con una forma complicada debido a los harmónicos introducidos por los efectos relativistas y los electrones se aceleran en pocos femtosegundos pasando de cero a una velocidad muy significativa.

La aceleración que produce un láser de este tipo es enorme, posiblemente la

Intensidad del láser	Energía máxima
10^{16} W/cm^2	1 keV
10^{17} W/cm^2	10 keV
10^{18} W/cm^2	100 keV
10^{19} W/cm^2	1 MeV
10^{20} W/cm^2	10 MeV
10^{21} W/cm^2	100 MeV
10^{22} W/cm^2	1 GeV

La tabla indica la energía máxima (aproximada) de un electrón movido por un láser linealmente polarizado de 800 nanómetros de longitud de onda central. Los electrones pasan de cero a esa energía en pocos femtosegundos y luego vuelven a cero y siguen así periódicamente los diez o doce ciclos del laser. Podemos considerar que para intensidades por encima de los 10^{18}W/cm^2 el movimiento es relativista.

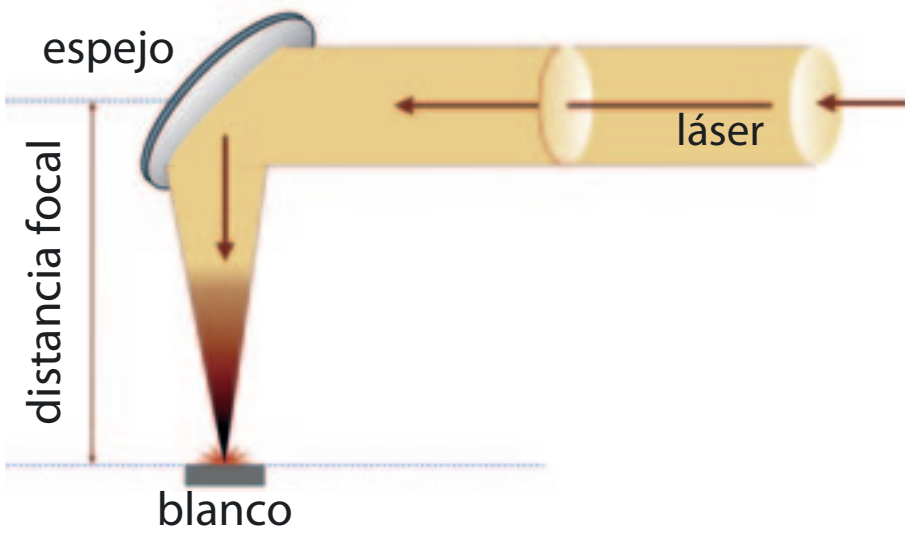
más violenta que se pueda lograr en ningún otro laboratorio. Lo cual es lógico, pues esos láseres son los campos eléctricos más intensos que se pueden conseguir. En cierto sentido, podemos decir que los láseres son los aceleradores por excelencia. Lo que pasa es que esta aceleración ultra-violenta dura poco y por ello las velocidades (energías) alcanzadas no son tan extraordinarias como con otros aceleradores convencionales. Cualquier acelerador convencional, por ejemplo los del CERN, aceleran mucho más lentamente que un láser de petavatio bien focalizado. Lo que pasa es que esa aceleración dura muchísimo más tiempo y la velocidad final es mucho mayor.

Evidentemente, la dinámica es válida para cualquier partícula cargada. Los positrones, se acelerarán igual (con un cambio de fase en la oscilación). Los protones tienen la misma carga, pero su masa es mucho mayor (unas 1.800 veces mayor). Por ello para tener la misma dinámica con un protón que con un electrón se necesitan 1800^2 veces más de intensidad del láser. Por eso la dinámica relativista de electrones empieza a 10^{18} W/cm^2 mientras que para protones empezará a 10^{24} W/cm^2 (es una intensidad a la que no se ha llegado, todavía).

Se ha demostrado que un láser de petavatio permite acelerar electrones a energías de GeV (gigaelectronvoltio) y protones a energías de centenares de MeV

Efectos de plasma

Lo que acabamos de describir vale para partículas cargadas aisladas. Cuando el láser incide sobre un blanco sólido (por ejemplo, una lámina de aluminio) se ionizan muchos átomos instantáneamente (en escasos femtosegundos) y se genera un plasma de electrones e iones. Los primeros se moverán mucho más rápidamente que los segundos y se provoca una dinámica muy peculiar, con unos campos inducidos muy intensos, siempre en escala de femtosegundos. Ahora esos efectos de plasma se empiezan a poder controlar y se pueden tener aceleradores muy sofísticados y muy compactos. Se ha demostrado, por ejemplo, que un láser de petavatio permite acelerar electrones a energías de GeV (gigaelectronvoltio) y protones a energías de centenares de MeV (en condiciones óptimas de aprovechamiento de los efectos dinámicos del plasma).



UN LÁSER DE 30 FEMTOSEGUNDOS es un disco de luz de 10 micras de grosor. Cuando esa energía se concentra el foco sobre un blanco, tenemos una intensidad extrema.

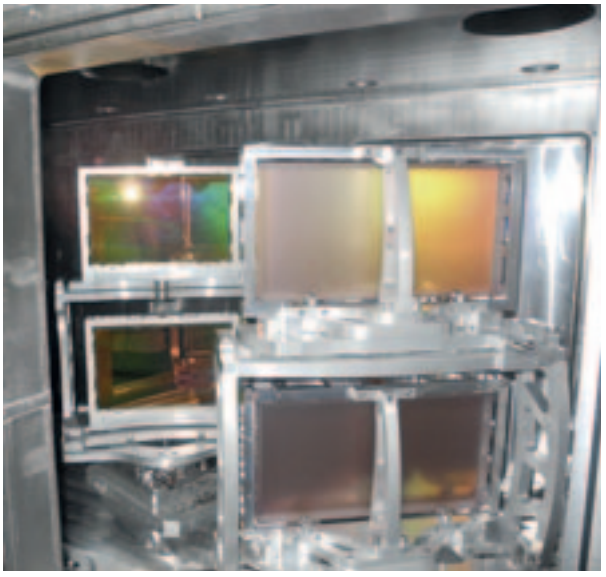
El láser como acelerador

Los láseres se están consolidando como los aceleradores de partículas del siglo XXI. Quedan muchos problemas por resolver, pero es un progreso que parece imparable. Los láseres son cada día más pequeños y potentes. Su progresión a la fecha es mucho mayor que la de los aceleradores convencionales y permiten considerar nuevos conceptos de aceleradores ultracompactos.

La comunidad de los láseres está trabajando en la actualidad para identificar aquellas aplicaciones de los aceleradores donde los láseres presentan ventajas cualitativas respecto a sistemas convencionales. Por ejemplo, al ser un sistema óptico, la protección radiológica está limitada sólo al sistema de focalización, lo que facilita su instalación en entornos complejos como hospitales (aplicaciones médicas) o aeropuertos (aplicaciones en seguridad).

Los sistemas de láseres pulsados generan evidentemente pulsos de partículas. Esos pulsos están bastante espaciados en el tiempo y, por ello, la corriente promedio que generan es baja o moderada, sin embargo la corriente instantánea es enorme, muy superior a la de grandes aceleradores. Eso permite considerar nuevos conceptos. Por ejemplo, podemos citar la terapia con protones. Se está avanzando mucho en analizar

DETALLE DE LA ENTRADA
AL COMPRESOR DE PULSOS
DEL SISTEMA DE PETAVATIO.
El haz del láser tiene 24 cm de diámetro y los tubos que lo protegen, 40 cm.
A la entrada, el pulso está estirado (*chirping*) y puede propagarse en el aire.
A la salida, una vez comprimido a 30 femtosegundos, ha de propagarse en alto vacío.



REDES DE DIFRACCIÓN DEL COMPRESOR DE PETAVATIO.
El compresor requiere de cuatro redes. El tamaño se aprecia en la imagen tomada durante la instalación.

las diferencias entre un haz de protones acelerado convencionalmente o un haz de protones acelerado por láser. Aunque la energía y su dispersión sean las mismas, en el caso convencional van llegando poco a poco al tejido a tratar, mientras que en el caso láser llegan de golpe. Los láseres también presentan muchas ventajas para fabricar dosis individuales *in situ* de radiofármacos de vida muy corta.

Física fundamental

Además de como aceleradores, los láseres ultraintensos se han convertido en una herramienta muy prometedora para física fundamental.

Como hemos indicado antes, el récord mundial está en torno a los 10^{22} W/cm^2, aunque se va avanzando de forma significativa. Hay diversos experimentos en planificación, uno de ellos en Salamanca, para estudiar lo que llamamos el vacío cuántico. Está claro que una partícula y su antipartícula se desintegran y emiten un par de fotones. Lo contrario, generar un par a partir de fotones, es también posible. Lo que pasa es que necesitamos dos fotones contra-propagantes de más de 500 keV cada uno. Nuestro láser es de 1.5 eV por fotón, o sea que para llegar a creación de pares se necesitarían centenares de miles de fotones.

El objetivo no es llegar a una creación real de pares, sino hacer que el proceso virtual correspondiente empiece a hacer que el vacío se modifique ligeramente. Es decir, hacer que el índice de refracción del vacío cambie muy ligeramente, o que la velocidad de la luz en el vacío (vacío, pero lleno de fotones) se modifique un poco.

Cuesta imaginar lo que son estas intensidades extremas, porque siempre pensamos el láser como una luz, un puntero láser... Como máximo, pensamos en la depilación láser.

Quizás deberíamos empezar a pensar en estos nuevos láseres de petavatio como luz dura, por decirlo de alguna forma. Se trata de una concentración de energía que cuesta imaginar. Sabemos que la masa es energía, $E=mc^2$. Imaginemos que un volumen de agua se convirtiese íntegramente en energía con esa relación. Es una densidad de energía enorme. Bien, ahora pensemos qué intensidad de láser hemos de tener para concentrar fotones que nos den esa misma densidad de energía, son aproximadamente 10^{24} W/cm^2. Ahora, los pulsos láser en el foco son ya más densos que el aire que nos rodea y pronto serán más densos que el agua. Más concretamente, cuando queremos entender esa densidad de energía extrema, la equivalencia $E=mc^2$ se convierte en $I=\rho c^3$, siendo I la intensidad del láser y ρ la densidad equivalente de la materia. La demostración (sencillita) queda para el lector...

El autor

El autor de este artículo, Luis Roso (Barcelona, 1955), estudió Físicas y Matemáticas simultáneamente entre 1972 y 1977, en la Universitat de Barcelona. Se doctoró en Óptica Cuántica por la Universitat Autònoma en 1981, donde llegó a Profesor Titular en 1985.

Fue Fulbright Visiting Scholar en la Universidad de Rochester, NY, en 1985-86, donde coincidió con el inicio de la tecnología CPA. En 1991 obtuvo una cátedra en la Universidad de Salamanca e inició el objetivo de lanzar la tecnología CPA en España.

Es el promotor y actual Director del CLPU. Desde el 2003, el láser más potente de España está en Salamanca, y ahora en el CLPU se ha instalado uno de los pocos láseres de petavatio que existen en mundo y uno de los tres únicos capaces de realizar un disparo por segundo a esa potencia.

Reto de futuro

Los láseres pulsados están avanzando de forma extraordinaria. Al llegar a potencias pico de teravatios o petavatios se abre una fenomenología completamente nueva. Ahora empezamos a entenderla y controlarla. El reto de futuro es aplicarla, por ejemplo, como aceleradores ultracompactos de partículas, o como herramientas de física fundamental, que permiten acceder a situaciones experimentales (campos eléctricos y magnéticos) nunca antes obtenidos en laboratorio. Están abriendo aplicaciones en medicina, radiofarmacia, astrofísica, energía, seguridad, etcétera, de las que sólo nos damos ahora una primera idea.

La Subdirección de Protección Radiológica Operacional, un área del CSN que vela por la seguridad de los trabajadores

Dentro de la Protección Radiológica, una parte esencial es la seguridad en el campo de las instalaciones radiactivas y, en general, la protección radiológica de los más de cien mil trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes en España. La Subdirección de Protección Radiológica Operacional se encarga de esta labor y de autorizar y mantener la seguridad de en torno a 1.345 instalaciones radiactivas de nuestro país.

Texto **Adriana Scialdone García** | Área de Comunicación del CSN |

En los números anteriores de 'El CSN por dentro' hemos podido analizar cómo trabaja el organismo regulador ante una emergencia radiológica desde su sala de emergencias (SALEM) y cómo se trabaja desde el Consejo para mantener la seguridad de los ciudadanos, pero todavía no nos habíamos centrado en quiénes son los que velan por la protección radiológica de todos los trabajadores que cada día desempeñan su labor profesional en una central nuclear o en una instalación radiactiva. Esta misión es la que lleva a cabo la Subdirección de Protección Radiológica Operacional (SPRO).

Esta subdirección forma parte de la Dirección Técnica de Protección Radiológica (DTPR) y en ella nos encontramos con un heterogéneo equipo de profesionales compuesto, entre otras especialidades, por biólogos, físicos, médicos, químicos, ingenieros y personal administrativo. Un total de 56 personas dedicadas en su día a día a evaluar, inspeccionar y supervisar cual-

La Subdirección de Protección Radiológica Operacional se encarga de la protección radiológica y de autorizar y mantener la seguridad de en torno a 1.345 instalaciones radiactivas de nuestro país.

quier actividad que implique manipulación, procesado, almacenamiento y clausura de sustancias radiactivas en este tipo de instalaciones.

Protección de los trabajadores

Uno de los principales objetivos de la SPRO consiste en asegurar la protección de los trabajadores expuestos, por motivos profesionales, a las radiaciones ionizantes, de forma que las dosis recibidas sean tan bajas como resulte razonablemente posible, y siempre por debajo de los límites reglamentarios.

La formación de las personas que trabajan en las instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico se considera un elemento fundamental para conseguir que el funcionamiento de las mismas se realice en las condiciones de seguridad adecuadas y se garantice la protección de los trabajadores y de la población. Para asegurar que se obtiene un grado de formación aceptable, se requiere que estas instalaciones obtengan una licencia o una acreditación concedida por el CSN.

Por una parte, en el caso de las instalaciones radiactivas, las licencias de operador y supervisor se conceden por un periodo de cinco años, tras los cuales debe procederse a su renovación a excepción de las instalaciones de radiodiagnóstico ya que las acreditaciones son indefinidas.

Historiales dosimétricos

Por otra parte, es necesario llevar un control desde esta área de las dosis recibidas por los trabajadores expuestos durante toda su vida laboral. Este control se materializa en lo que llaman el historial dosimétrico individual, donde se registran y se mantienen actualizadas las dosis recibidas por cada trabajador. Recogidos estos datos, el CSN creó un Banco Dosimétrico Nacional (BDN), garantizando así un archivo fiable y seguro para la identificación de cualquier trabajador expuesto.

En el control de dosis de trabajadores

Entrevista a Javier Zarzuela Jiménez

"He pasado de un ámbito en el que mi competencia técnica era muy reconocida a otro en el que he tenido que preguntarme cómo puedo contribuir"

Javier Zarzuela Jiménez es funcionario de la Escala Superior del Cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica en el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Antes de ser el subdirector de Protección Radiológica Operacional (SPRO) fue subdirector de Instalaciones Nucleares dentro de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear y anteriormente también ocupó puestos como el de inspector residente en las centrales nucleares de Ascó y Almaraz.

PREGUNTA. Con una extensa trayectoria dentro de este organismo, ¿qué es lo que más destacaría profesionalmente de todos estos años al servicio del CSN?

RESPUESTA. Yo me incorporé al CSN al poco de su creación y he tenido el privilegio de participar en su asentamiento y desarrollo. Creo que el CSN desde su creación tuvo la vocación de estar entre los mejores reguladores nucleares del mundo, lo cual ha exigido a sus profesionales un esfuerzo continuo por mantenerse conectados con sus pares de otros países y participar en las iniciativas internacionales de mejora de seguridad nuclear y radiológica.

P. Dentro de este ámbito, ¿cómo ve el futuro? ¿Cuáles son los retos de esta subdirección?

R. Tengo la fortuna de contar en la subdirección con excelentes profesionales de reputación técnica muy reconocida. Es un equipo que tiene entusiasmo por su trabajo, por seguir aprendiendo y abordar los nuevos retos. Además, yo valoro mucho la buena relación existente con los foros, sociedades y profesionales de los sectores regulados, cuya cooperación me parece imprescindible para una regulación transparente y bien fundamentada.

Esta valoración es extensible al personal administrativo que está perfectamente integrado en la estructura y alineado con los objetivos de la subdirección.

En cuanto a los retos, yo destacaría la transposición de la Directiva europea 2013/59/ sobre protección radiológica de la que hablaré más adelante.

El segundo reto es reforzar la seguridad física de las fuentes radiactivas de nuestro país, para cuyo refuerzo tenemos muy avanzada una Instrucción del Consejo. Una vez aprobada, su aplicación supondrá un notable esfuerzo de evaluación e inspección para esta subdirección.

Por último, me gustaría destacar varias iniciativas que tenemos en marcha con diverso grado de avance, tales como inventariar las instalaciones radiactivas con problemas de viabilidad y protocolizar las actuaciones del CSN para controlar su seguridad, revisar el programa de inspección para sistematizar la realización de inspecciones no

(Sigue en la página 30)

En la imagen, Javier Zarzuela, subdirector de Protección Radiológica Operacional (SPRO).

(Viene de la página 29)

anunciadas y para aplicar el 'enfoque graduado' (*graded approach*) recomendado por los organismos internacionales, tanto en lo que se refiere a la frecuencia como al alcance, o la puesta en marcha de un panel interdisciplinar de revisión de experiencia operativa en instalaciones radiactivas, en el que revisamos las experiencias españolas y las distribuidas por sistemas internacionales de notificación.

P. ¿Qué supone la transposición de la Directiva 2013/59/Euratom de 2013?

R. Por su impacto social, como económico y regulador, la SPRO está implicada en una serie de cambios requeridos por la directiva, entre los que destacan: la reducción drástica del límite anual de dosis al cristalino para trabajadores, que impactará significativamente en prácticas de trabajo de sectores como la radiología intervencionista, la regulación de exposiciones radiológicas con fines no médicos, la revisión del actual régimen de autorizaciones para actualizarlo con el de nuestros socios europeos y la colaboración con las autoridades sanitarias en la revisión de los niveles de referencia de procedimientos médicos.

expuestos que prestan servicio en diferentes instalaciones, por ejemplo, los que van a las paradas de recarga de cada central nuclear a realizar trabajos muy especializados, cumple un papel importante el carné radiológico, un documento en el que se recoge información en relación a las dosis que han recibido en cada instalación.

Además, la SPRO es la unidad responsable, dentro del CSN, de evaluar y supervisar el funcionamiento de las Unidades Técnicas de Protección Radiológica (UTPR), los Servicios de Protección Radiológica (SPR) y los Servicios de Dosimetría Personal (SDP) con quienes mantiene una relación dual de vigilancia y cooperación.

Autorización de instalaciones

El CSN también es responsable de evaluar todas las solicitudes de autorización de nuevas instalaciones radiactivas o sus modificaciones y supervisar su funcionamiento; dentro del organismo, se trata de otra de las funciones con las que cumple esta subdirección. En todos estos casos se requiere el informe preceptivo del organismo regulador.

Las instalaciones radiactivas, ya sean médicas, industriales o de investigación, se autorizan de acuerdo a lo establecido en el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR). Una vez autorizadas es necesario supervisar y controlar su funcionamiento, lo que se lleva a cabo a través de distintos mecanismos. El más directo se basa en las inspecciones que realizan el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) o las comunidades autónomas con acuerdo de encomienda de funciones suscritos con el Consejo, que van orientadas a comprobar el cumplimiento de los requisitos específicos de seguridad y protección radiológica. Anualmente se realizan, directamente por el personal del CSN o bien por el de las comunidades autónomas, unas mil seiscientas inspecciones a instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico.

Esta subdirección tiene otra importante labor, la del control de las fuentes radiactivas de alta actividad. El organismo regulador debe mantener un control sobre dichas fuentes, es el responsable de la creación y mantenimiento de un Inventario Nacional de fuentes radiactivas de alta actividad y de sus poseedores, así como del establecimiento de un sistema de seguimiento y control de las transferencias de esas fuentes desde su entrada en nuestro país hasta su salida, al final de su vida útil, o su almacenamiento como residuo radiactivo en una instalación autorizada.

Todas estas labores son realizadas por los profesionales de la SPRO que, una vez más, tienen en sus manos la responsabilidad de la seguridad de los trabajadores, la autorización de las instalaciones radiactivas y su posterior seguimiento y el control de las fuentes radiactivas.

La apertura de la Segunda Conferencia Internacional de Seguridad Física Nuclear contó con la intervención de Jorge Fernández Díaz, ministro del Interior, Fernando Marti Scharfhausen, presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Stephen G. Burns, presidente de la Nuclear Regulatory Commission de Estados Unidos (USNRC), y Juan Carlos Lentijo, director general adjunto de Seguridad Nuclear del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

El CSN acoge en Madrid la Segunda Conferencia Internacional de Seguridad Física Nuclear

La segunda edición de la Conferencia Internacional de Seguridad Física Nuclear se celebró durante los días 9 y 13 de mayo en el auditorio del Museo del Prado (Madrid). Estas jornadas contaron con las intervenciones de Jorge Fernández Díaz, ministro del Interior, Fernando Marti Scharfhausen, presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Stephen G. Burns, presidente de la Nuclear Regulatory Commission de Estados Unidos (USNRC), Juan Carlos Lentijo, director general adjunto de Seguridad Nuclear del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y el secretario de Estado de Seguridad del Ministerio del Interior, Francisco Martínez Vázquez, entre otros.

Texto **Adriana Scialdone García** | Área de Comunicación del CSN |

El propósito de esta conferencia, organizada por el CSN, es fortalecer la generación de capacidades de seguridad física nuclear en todo el mundo y apoyar la implementación de buenas prácticas en este campo, proporcionando asimismo una plataforma de diálogo, intercambio de experiencia y fortalecimiento de relaciones entre entidades reguladoras homólogas competentes en seguridad física de materiales nucleares y radiactivos.

En esta segunda edición se trataron múltiples temas de gran relevancia como la importancia de un organismo regulador fuerte e independiente, los nuevos retos regulatorios, la protección de la información y la confidencialidad, la eficacia de la seguridad, la seguridad de los reactores de investigación, la seguridad de las fuentes y el transporte y la cultura de la seguridad física nuclear.

> *El propósito de esta conferencia, organizada por segunda vez por el CSN, es fortalecer la generación de capacidades de seguridad física nuclear en todo el mundo y apoyar a implementación de buenas prácticas en este campo*

Fernando Marti Scharfhausen, incidió en la oportunidad que supone este encuentro "para aprender unos de otros y fortalecer la colaboración, con el objetivo común de desarrollar estrategias conjuntas de regulación nuclear para proteger tanto a los ciudadanos y como las denominadas infraestructuras críticas". Por su parte, el presidente del regulador estadounidense, Stephen G. Burns, subrayó que esta conferencia "se basa en el trabajo de cuatro años, en los que hemos mantenido las mismas inquietudes: los marcos legales y reglamentarios para la seguridad, las metodologías de establecimiento de amenazas base de diseño y su evaluación así como la protección de la información y la ciberseguridad, la conexión entre la normativa de seguridad y su protección o la confianza personal".

Asimismo, Juan Carlos Lentijo, mencionó la ampliación de la aplicación de la Convención sobre protección física de material nuclear que se produjo el pasado 8 de mayo. "Este importante hito significa que ahora hay requisitos le-

Los consejeros del CSN Fernando Castelló, Cristina Narbona y Javier Dies, intervinieron en estas jornadas a través de la moderación de distintas mesas redondas

España pasará de 185 a 490 efectivos de la Guardia Civil, para cubrir la seguridad en centrales nucleares por el "desafío" yihadista

Durante la inauguración de la Segunda Conferencia Internacional de Reguladores de la Seguridad Física Nuclear, el ministro del Interior en funciones, Jorge Fernández Díaz, señaló que España pasará de 185 a 490 efectivos para cubrir la seguridad física de las centrales nucleares españolas y el material nuclear, que requieren de unos sistemas de protección y seguridad "acordes a la actual amenaza terrorista".

Fernández Díaz reconoció que los "continuos ataques del terrorismo yihadista contra la estabilidad demuestran que los desafíos para la Seguridad Nacional revisten una elevada complejidad que ha desbordado los conceptos tradicionales de defensa y seguridad pública".

Asimismo, destacó que las instalaciones nucleares y el material nuclear requieren de sistemas de protección y seguridad de acuerdo a la amenaza existente que no solo deberán estar "perfectamente capacitados" para intervenir, detectar y retardar "cualquier intento de ataque" sino también para responder "adecuadamente" para garantizar la seguridad de los ciudadanos y su protección.

En este contexto, explicó que el nuevo modelo definido para la seguridad de las centrales nucleares en España se basa en la activación de Unidades de Respuesta de la Guardia Civil, que se ubicarán de forma permanente en cada una de las centrales nucleares.

En concreto, precisó que en 2016 hay 185 efectivos dedicados a este fin y que la cifra aumentará en otros 305 en 2017, hasta cubrir todas las centrales nucleares en España hasta un total de 490 efectivos.

En su intervención, Fernández Díaz felicitó al Consejo de Seguridad Nuclear por "convertir estos días a España en el centro de referencia a nivel mundial en el campo de la seguridad nuclear, demostrando una vez más, la solvencia y el protagonismo de los españoles y sus instituciones en muchos ámbitos, y también en el de la Seguridad Nuclear".

El ministro del Interior en funciones, Jorge Fernández Díaz, durante su intervención en las jornadas.

En la imagen, la intervención del consejero Javier Dies durante una de las ponencias del congreso.

galmente vinculantes para los países para proteger las instalaciones nucleares, así como los materiales nucleares objeto de utilización, almacenamiento y transporte" matizó.

En la clausura, el presidente del CSN hizo hincapié en una de las conclusiones principales de esta conferencia, como el refuerzo de los modelos de seguridad física de las instalaciones nucleares, de los transportes de material nuclear y de las fuentes radiactivas "para dar respuesta a las amenazas actuales". Por su parte, Stephen G. Burns, aseguró que "la colaboración y la comunicación son importantes en muchas áreas, pero aumenta su importancia cuando hablamos sobre la seguridad física de las instalaciones nucleares en todo el mundo".

El consejero Fernando Castelló fue unos de los moderadores de las distintas mesas redondas que se celebraron durante la Segunda Conferencia Internacional de Seguridad Física Nuclear.

Durante tres días, más de 200 expertos en seguridad física de 20 países analizaron los diferentes aspectos de esta materia a lo largo de diez paneles de trabajo que han abarcado, desde la independencia del organismo regulador, hasta la seguridad física de las fuentes radiactivas, pasando por el desarrollo de la cultura de seguridad o la confidencialidad de la información.

Los consejeros del CSN Fernando Castelló, Cristina Narbona y Javier Dies, intervinieron en las jornadas a través de la moderación de distintas mesas redondas sobre aspectos de la seguridad física.

> *Más de 200 expertos analizaron los diferentes aspectos de esta materia que han abarcado desde la independencia del organismo regulador, hasta la seguridad física de las fuentes radiactivas, el desarrollo de la cultura de seguridad o la confidencialidad de la información*

El programa de trabajo se completó con ocho intervenciones monográficas que abarcaron, por ejemplo, las lecciones aprendidas en esta materia (seguridad física) cinco años después del accidente de Fukushima, las medidas de protección que se aplican a la información confidencial en España, el trabajo que lleva a cabo la Asociación Europea de Reguladores Europeos de Seguridad Física (ENSRA, por sus siglas en inglés) o la labor que llevan desarrollando, desde hace veinte años, las misiones internacionales de seguridad física (IPPAS) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

El CSN participa en la Conferencia Internacional sobre el Fomento de la Aplicación Global de Programas de Clausura y Restauración Ambiental del OIEA

Texto Área de Comunicación del CSN |

Durante los días 23 al 27 de mayo de 2016 tuvo lugar la Conferencia Internacional sobre el Fomento de la Aplicación Global de Programas de Clausura y Restauración Ambiental (*Advancing the Global Implementation of Decommissioning and Enviromental Remediation Programmes*), organizada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). A esta conferencia asistieron representantes de todos los continentes relacionados con el sector, entre los que destacó la presencia del presidente de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), Juan José Zaballa; el consejero del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Fernando Castelló, y el director general adjunto de Seguridad Nuclear del OIEA, Juan Carlos Lentijo, entre muchos otros.

Durante estas jornadas se intercambiaron y examinaron las enseñanzas extraídas de las actividades de desmantelamiento, clausura y restauración ambiental durante el decenio pasado. Entre los objetivos de la conferencia destacaron, entre otros, la concienciación sobre la necesidad de abordar el legado de actividades nucleares pasadas, la determinación de ámbitos prioritarios y la recomendación de estrategias para fomentar la ejecución segura y eficaz de programas de desmantelamiento, clausura y restauración ambiental.

“Situación simple y compleja, al mismo tiempo”

Diferentes periodistas tuvieron la ocasión de poder preguntar, durante una rueda de prensa, al presidente de Enresa, Juan José Zaballa, al director general adjunto de Seguridad Nuclear del OEIA, Juan Carlos Lentijo, y al director de la División del Ciclo del Combustible Nuclear de este organismo, Christophe Xerri.

El presidente de Enresa refiriéndose a las centrales nucleares españolas, recordó que, si el cierre de la última nuclear se produce en 2028, las labores de desmantelamiento no empezarán antes del 2031. Será un “esfuerzo muy importante de financiación” y de disponibilidad de localizaciones para los residuos nucleares. Además explicó que “siempre hay estrategias” para sortear posibles dificultades derivadas del futuro Almacén Temporal Centralizado de residuos de alta actividad (ATC, en el municipio conquense de Villar de Cañas)

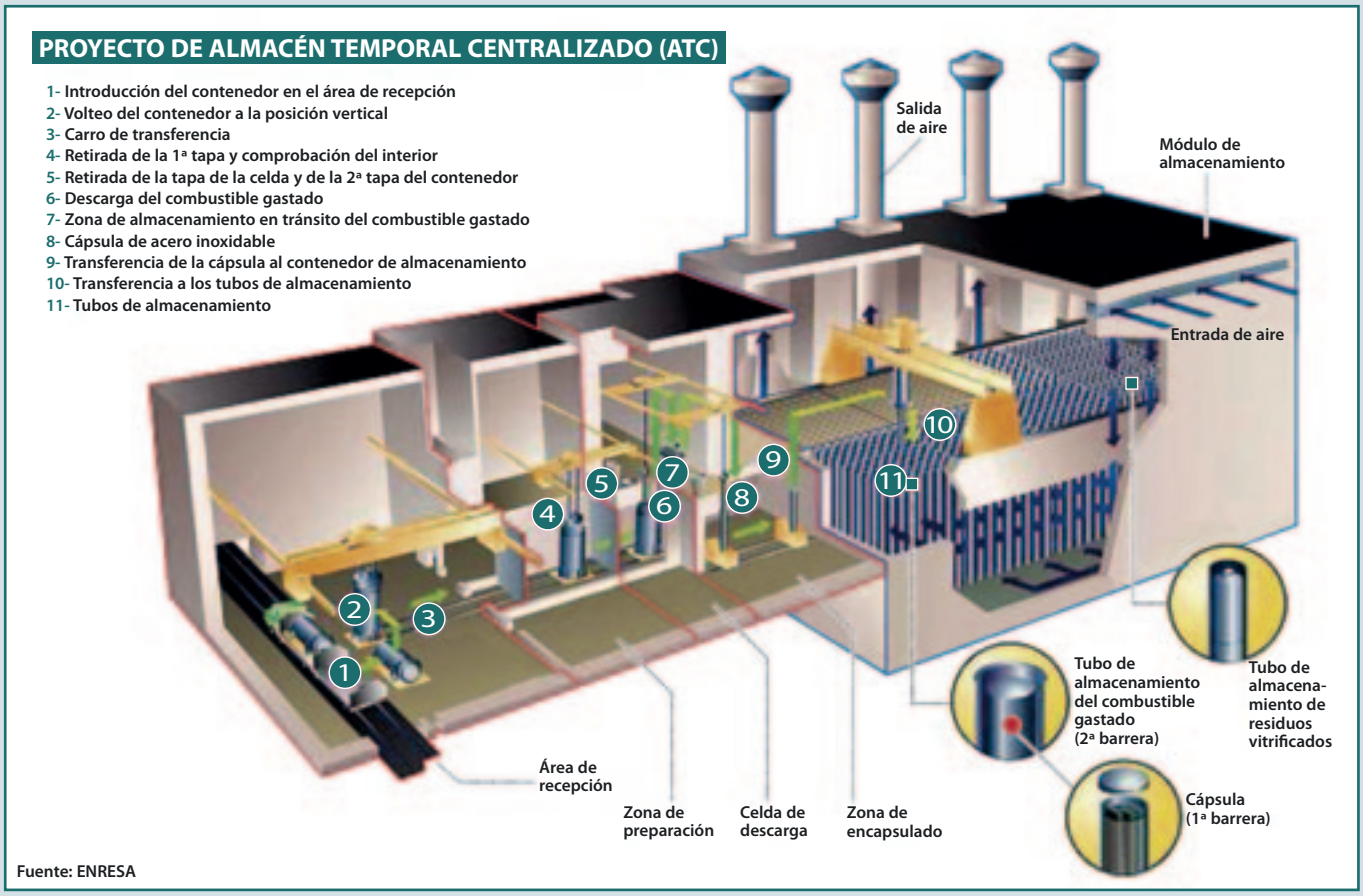
Por su parte, Juan Carlos Lentijo, destacó “que la situación es simple y compleja, al mismo tiempo”, debido a que muchas de las centrales en operación están llegando al final de su vida operativa. Muchas de ellas están en proceso de alargar la vida útil a 60 años y otras que se construyeron en torno a los años 70 o principios de los 80 optan por el cese de actividad con el consecuente proceso de desmantelamiento y de restauración ambiental. En la actualidad hay en torno a 160 centrales nucleares que están en diversas fases de operación y es posible que en el próximo decenio se unan unas 100 más. Los países necesitan diferentes planes para acometer estos procesos así como los fondos suficientes para hacerlo.

Principales retos

Fernando Castelló destacó en su intervención los principales retos a los que se enfrenta un regulador relacionado con el desmantelamiento, desde un punto de vista normativo, como por ejemplo: dotar de un marco jurídico adecuado y dinámico en su aplicación, minimizar la producción de residuos, optimizar la protección radiológica de los trabajadores y aplicar los criterios y principios para la liberación de emplazamientos del control regulador. El consejero remarcó la importancia de la cooperación internacional en este ámbito, para ayudar a los países que están comenzando a actuar en el marco de los procesos de clausura y restauración ambiental.

Durante los cinco días que duró la conferencia se llevaron a cabo diferentes presentaciones en relación al establecimiento de estrategias nacionales y políticas para habilitar y mejorar los procesos de desmantelamiento y restauración ambiental. También tuvieron lugar exposiciones que

La conferencia contó con expertos de todo el mundo para estudiar las formas de avanzar en los principales retos de diferentes materias.



pusieron un marco de referencia en lo que se refiere a los aspectos técnicos y tecnológicos de la implementación de los procesos de clausura y desmantelamiento de las centrales nucleares. Además, se remarcaron los procesos para la optimización de la gestión de residuos y materiales durante las clausuras.

Cabe destacar la presencia de la subdirectora de Protección Radiológica Ambiental, Lucila Ramos, y la del jefe de Área de Instalaciones del Ciclo y Desmantelamiento, José Luis Revilla, ambos pertenecientes al Consejo de Seguridad Nuclear.

Lucila Ramos moderó una mesa durante la jornada del martes en la que se abordaron temas como las normas internacionales para la reglamentación nacional, estado actual, perspectivas de futuro y los desafíos en el marco de la regulación y las experiencias en los procesos de desmantelamiento. Por su parte, José Luis Revilla, moderó el panel de discusión que tuvo lugar ese mismo martes en horario de tarde. Durante esta jornada se destacaron los elementos clave necesarios en un marco normativo nacional para fomentar el progreso y mejora en la clausura y desmantelamiento de las centrales.

El presidente de Enresa, Juan José Zaballa cerró las conferencias con una intervención en la que recalcó que los gobiernos deben asegurarse de que existen instalaciones adecuadas para la gestión de los residuos y su eliminación y que, los mismos, deben establecer políticas nacionales y estrategias relacionadas con los temas tratados en el caso de que no existieran actualmente. Además, destacó que la experiencia en los últimos años ha demostrado la relevancia de este aspecto para una exitosa implementación y ejecución desde la clausura a los procesos de restauración ambiental. La conferencia contó con más de 500 expertos y técnicos de todo el mundo para estudiar las formas de avanzar en la clausura de instalaciones nucleares, así como en la restauración ambiental de emplazamientos con contaminación radiactiva residual.

España acogió esta conferencia del OIEA mediante la coordinación por parte de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA). Este evento se celebró en colaboración con la Comisión Europea, la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (NEA-OCDE) y el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo.

Marie Curie:
la fe en lo invisible

Se la ha llamado la madre de la radiactividad; se la ha puesto como ejemplo de tesón y de lucha contra las contrariedades, tanto las derivadas de su condición de mujer y científica a comienzos del siglo XX como las que la vida le puso en el camino, comenzando por la brusca pérdida de Pierre Curie, su mitad profesional y sentimental. Combinó la pasión por la ciencia con el amor a su marido y a sus hijas. Y llegó a donde ninguna investigadora había llegado hasta entonces, en su búsqueda de los elementos desconocidos que escondían la clave de la radiación.

■ Texto **Vicente Fernández de Bobadilla** | Periodista científico ■

En la página *web* de la Fundación Nobel puede verse a Marie Curie en dos vídeos, ambos breves y sin sonido: en el primero, filmado en 1923, muestra a la cámara su laboratorio de investigación en París, y el ojo actual queda sorprendido por la austeridad de los instrumentos y la desnudez de las instalaciones; el segundo es de dos años antes, y se refiere a su visita a Estados Unidos, cuando fue recibida por el presidente Warren Harding.

En ningún momento del metraje esboza Curie algo parecido a una sonrisa. Su actitud parece formal, distante, como si le incomodara abrir las puertas de su lugar de trabajo al aún balbuceante periodismo audiovisual, o como si acceder al mandatario estadounidense fue un compromiso del que hubiera preferido librarse. Quizá porque la leucemia que acabaría matándola en 1934 ya estaba minando sus fuerzas hasta el punto de impedirle fingir un mínimo entusiasmo, o quizá porque era consciente de que toda la atención mundial de que era objeto se debía en buena parte a su posición como mujer, que habría sido excepcional hoy en día y lo fue mucho más entonces; sin embargo, el esfuerzo, los sacrificios y las desgracias que habían marcado su vida quedaban fuera de la cobertura de los medios.

Primera mujer de la historia en ganar el premio Nobel de Física, en 1903; primera mujer de la historia en recibir dos premios Nobel, el segundo, de Química, en 1911; madre de otra premio Nobel, Irene Curie, que lo obtendría en 1935 por el descubrimiento de la radiactividad artificial; fundadora y directora del Instituto del Radio de París; miembro de las Conferencias Solvay desde el inicio de las mismas, en 1911, hasta su muerte; primer miembro femenino de la Academia Francesa de Medicina; codescubridora de dos elementos, el radio y el polonio; pionera en el uso de la radiactividad en el campo médico. Pero también hija de un hogar empobrecido, rechazada y calumniada en su país de adopción, ensombrecida en sus logros académicos y científicos por la figura de su marido, viuda temprana, y de salud frágil y progresivamente deteriorada, precisamente como consecuencia de su dedicación a aquel campo de la ciencia donde estaba casi todo por descubrir, incluida la toxicidad de los mismos elementos que constituían la base de su trabajo.

En cuerpo y alma

Hay aspectos de la vida de Marie Curie que han trascendido más allá del ámbito científico; podría decirse que algunos de ellos, paradójicamente, han tardado demasiado. En 1995 Susan Quinn publicó una biografía de la científica, la primera redactada tras tener acceso a su diario personal, que también sería publicado posteriormente; surgió entonces su parte humana, hasta entonces oculta tras la máscara de la investigadora entregada en cuerpo y alma al trabajo. Las cartas a sus

Marie Curie, Pierre Curie y el profesor Petit, en el pabellón de investigaciones.

hijas Eve e Irène, publicadas recientemente, terminan de ofrecer el retrato completo, el que imbrica de forma inseparable a la mujer, la hermana, la esposa, la madre y la investigadora.

La infancia y juventud de Marie Curie son bien conocidas: nacida en 1867 en Varsovia con el nombre de Maria Salomea Sklodowska, sus familias paterna y materna coincidían en haber conocido tiempos mejores en lo económico –su apoyo a la independencia de Polonia, que entonces pertenecía en parte a Rusia, les costó sus fortunas–, pero mantenían intacta una sólida formación cultural: su padre enseñaba física y matemáticas, y su madre era maestra, pianista y cantante. Este ambiente despojado de lujos pero en el que primaba el conocimiento iba a seguir muy presente en su vida adulta, donde cualquier austeridad en el domicilio era bienvenida si a cambio permitía destinar sus recursos a la investigación.

Otra constante de la vida de Maria –o Manya, como la llamaban sus padres– quedó fijada también en esos primeros años: la dificultad de acceder al estudio, al trabajo, a la investigación, a las instituciones. Entrar en todos estos ámbitos le fue difícil, pero cuando lo consiguió, destacó de forma natural: se graduó en la escuela a los 15 años con las máximas calificaciones y medalla de oro, pero el sistema educativo de la Polonia ocupada no le permitiría ir mucho más allá; las mujeres tenían vetado el acceso a la universidad. La solución estaba en el extranjero, en París, y mientras trabajaba como gobernanta y profesora de niños para reunir el dinero de la matrícula, acudía con su hermana Bronya a lo que se llamaba "universidad flotante" o clandestina, todo un placebo de la enseñanza superior que se le negaba, donde los lugares de reunión cambiaban constantemente para esquivar a la policía.

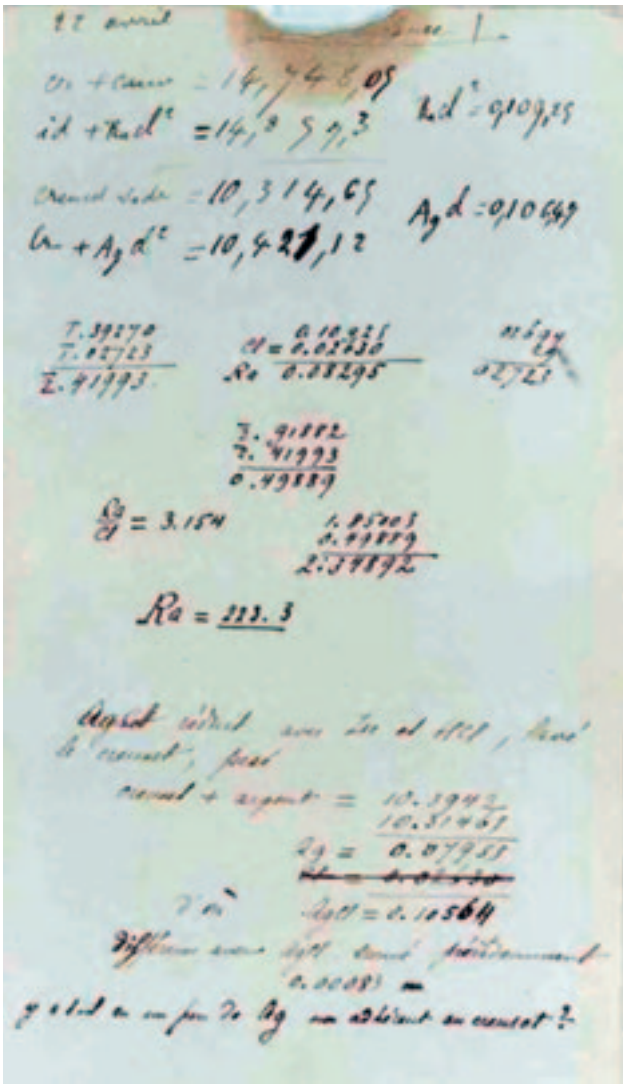


Imagen de una de las páginas del cuaderno de trabajo del matrimonio Curie, durante sus estudios sobre el radio y el polonio.

Hasta los 24 años no conseguiría ahorrar lo suficiente para acceder a la Sorbona. Recuperó tiempo: en tres años se había graduado en matemáticas y en física, resistiendo en una habitación diminuta y helada, alimentándose, según escribió ella misma, de pan, chocolate, huevos y fruta. Su curiosidad era la que nunca quedaba saciada: "Dividía mi tiempo entre las clases, el trabajo de laboratorio y el estudio en la biblioteca. Por la noche trabajaba en mi habitación, a veces hasta muy tarde. Todo lo que vi y aprendí que fuera nuevo suponía un placer para mí. Era como si se me abriera un mundo nuevo, el mundo de la ciencia, que al fin se me permitía conocer con plena libertad".

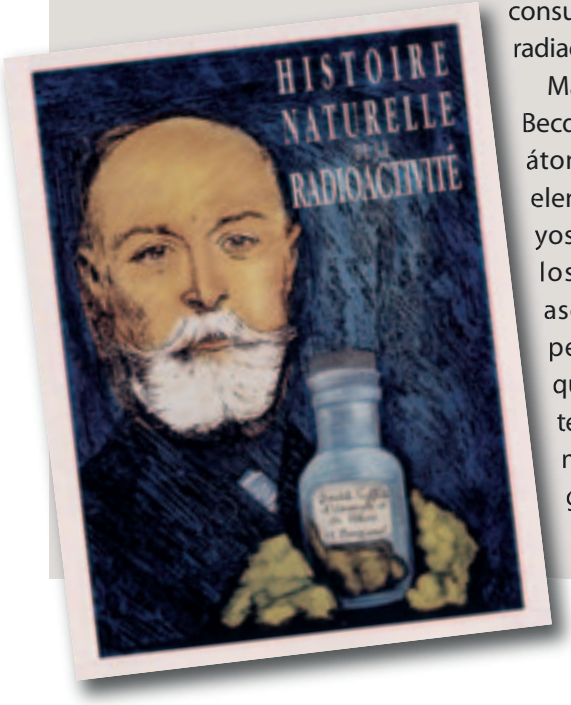
Una pareja de ciencia

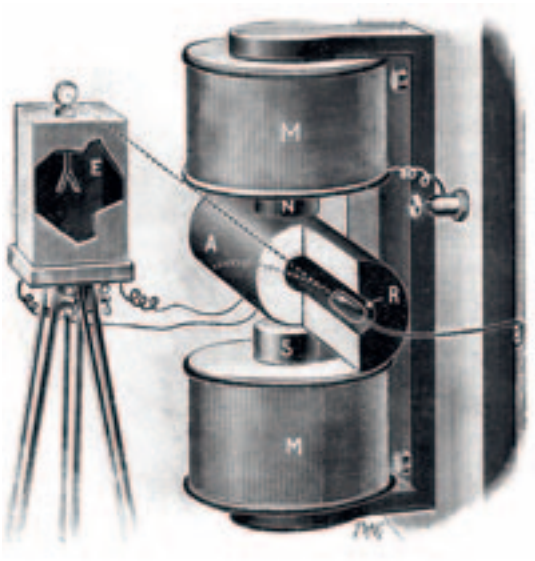
Puede decirse que conoció a su marido como resultado de tanto esfuerzo; sus calificaciones le dieron una beca, y un trabajo en la Sociedad para el Impulso de la Industria Nacional, que quería que trabajara sobre las propiedades magnéticas de distintos tipos de acero. Para ello, recurrió a las instalaciones de la Escuela Municipal de Física y Química Industrial de París, cuyo director de laboratorio era Pierre Curie. La historia de cómo se conoció la que quizá sea la pareja de científicos más célebre del mundo es tan tranquila y falta de estridencias como el propio trabajo de laboratorio: les presentaron en 1894 en casa de un amigo común. Luego se verían con frecuencia en el trabajo. Sus conversaciones y cartas pasaron de lo académico a lo personal, de allí a lo íntimo, llegando por fin al punto de no retorno: Pierre no sólo la quería como esposa; quería que renunciara a Polonia –algo nada fácil para alguien criado en un hogar de fuertes convicciones nacionalistas– y se quedara con él en París, compartiendo todos los aspectos de su vida. "Había dedicado su vida a su sueño de la ciencia: sentía la necesidad de una compañera que viviera su sueño con él". Se casaron en julio de 1895.

120 años de radiactividad

Han pasado 120 años de aquel descubrimiento. Fue en 1896 cuando el francés Antoine Enri Becquerel descubrió por casualidad un fenómeno totalmente nuevo. Se dejó en un cajón un paquete de sales de uranio, encima de un rollo de placa fotográfica, y días después comprobó que la placa estaba oscurecida como si le hubiera dado la luz; así que pensó que esas sales emitían unos rayos penetrantes, que eran capaces de atravesar metales. Sin embargo, Becquerel perdió interés en el tema y se lo pasó a una estudiante polaca que no tenía muy claro sobre qué hacer la tesis doctoral. Ella, Marie Curie, investigó mucho más a fondo esas piedrecillas que emitían constantemente tanta energía y parecían no consumirse, y bautizó aquello como radiactividad.

Marie descubrió que los rayos de Becquerel venían del interior de los átomos de uranio y que sólo otro elemento, el torio, emitía unos rayos parecidos. Entonces estudió los minerales de uranio y vio asombrada que uno de ellos, la pecblenda, era más radiactivo que si fuera uranio puro: su hipótesis fue que aquella roca contenía una cantidad mínima de algo desconocido y muy radiactivo.





Marie Curie utilizó el término radioactividad por vez primera en 1898, como nomenclatura de la energía que se originaba en sus investigaciones.

El examen de su vida en común en los primeros años responde exactamente a la idea que se había firmado Pierre: la investigación les absorbía y les fascinaba por igual a ambos. Todo lo demás venía después. Irène, la primera hija de la pareja, nació en septiembre de 1897 y el padre de Pierre se fue a vivir con ellos para ayudarles en el cuidado de la niña. Marie recordó en sus memorias que apenas se relacionaban con nadie, salvo con algunos colegas que acudían a visitarles de vez en cuando. Era una existencia, si no monacal, sí ajustada a un presupuesto escaso y a mucho trabajo por hacer, pero con la tranquilidad que necesitaban para avanzar en su labor, una existencia donde "alcanzamos la gran obra de nuestras vidas, una obra que comenzó a finales de 1897 y que duraría muchos años".

Una energía nueva

La 'gran obra' no tenía entonces ni siquiera un nombre propio. Era un camino sin transitar, que Marie consideró idóneo para lograr un objetivo igualmente lejano: ser la primera mujer en lograr un doctorado en ciencia. Lo que llamó su atención fue el descubrimiento realizado en 1895 por el alemán William Roentgen, de rayos que traspasaban la materia sólida, descubrimiento confirmado por el hallazgo del francés Henri Becquerel de la radiación presente en el uranio. La atención de la comunidad científica se enfocaba en Roentgen y en las aplicaciones médicas de sus Rayos X; Marie decidió concentrarse en el uranio y comenzó a examinar otros elementos para ver si alguno emitía aquella nueva y extraña energía. La descubrió en el torio, en cuestión de días, y también descubrió que la cantidad de energía dependía de la cantidad del elemento presente; ningún otro factor, su estado líquido o sólido, puro o combinado con otros elementos, parecía afectarla, lo cual le permitió deducir que la energía se originaba dentro de las propias moléculas.

Una energía nueva necesitaba un nombre nuevo, y Marie utilizó el término radiactividad en 1898, mientras continuaba buscando elementos que pudieran contenerla. La halló en algunos minerales, pero en unos porcentajes anormalmente elevados, incluso con la presencia en ellos de uranio y torio. Formuló la teoría de que debía existir otro elemento químico mucho más radiactivo, y que, al haber examinado todos los elementos conocidos, debía ser uno completamente nuevo. El afán por descubrirlo arrastró a

su marido, que abandonó su estudio sobre cristales para trabajar con ella. Los cuadernos de trabajo del matrimonio son la mejor prueba de su nivel de entusiasmo y compenetración, donde en la misma página se alternan párrafos, frases o anotaciones escritas por ambos.

En 1898 el trabajo conjunto dio sus frutos, con el hallazgo de dos nuevos elementos, el radio y el polonio, este último bautizado así en honor al país natal de Marie. Los encontraron trabajando sobre un mineral uránico, la pechblenda, que presentaba más radiactividad que el uranio en sí, pero el precio era alto: hicieron falta cuatro años trabajando sobre toneladas de este mineral –donadas por el gobierno de Austria– para extraer un decigramo de cloruro de radio. El trabajo, además de costoso y físicamente duro, necesitaba de espacio, por lo que trasladaron su laboratorio a un cobertizo abandonado en la Escuela de Física. El equipamiento era menos que básico, las condiciones, primitivas; convivían con los gases irritantes producidos por sus experimentos químicos. Y aún así, Marie recordó aquellos tiempos como los años más felices de su vida.

En aquellos años, la pareja comenzó a experimentar dolencias que en un principio parecían fruto del cansancio; pero Pierre descubrió que el radio afectaba a los tejidos vivos y abrió una nueva vía de investigación en la medicina para el tratamiento del cáncer. Era el principio de la radioterapia; también de la enfermedad que afectaría a los Curie, aunque Pierre no viviría lo suficiente como para padecerla hasta el final.

Curie dirigió el Instituto del Radio de París hasta su fallecimiento por sobreexposición a los agentes radioactivos cuyas propiedades investigaba buscando mejorar la salud de los demas

En 1903, Marie se convirtió en la primera mujer europea en obtener un doctorado en física; ese mismo año llegó el premio Nobel, pero el trabajo y la salud les impidieron recogerlo hasta 1905: sólo Pierre viajó a Estocolmo y él pronunció el discurso de agradecimiento, a pesar de haber entrado en la investigación a instancias de su esposa. En 1904 fue nombrado catedrático de física en la Universidad de París y en 1905, miembro de la Academia Francesa. Su mujer no obtuvo los mismos galardones.

Con su trabajo en el centro de la comunidad científica y dotados por fin de los medios suficientes, su obra conjunta terminaría el 19 de abril de 1906, cuando Pierre murió atropellado por un coche de caballos. Es difícil encontrar una expresión más cruda del dolor de una pérdida que el que reflejan las propias notas de Marie: "Todo se ha terminado. Pierre duerme su último sueño bajo tierra. Es el final de todo, de todo, de todo". No lo era, y aunque regresar por primera vez sola a aquel laboratorio donde la figura de su marido era al mismo tiempo presencia y ausencia le supuso un esfuerzo sobrehumano, también descubrió que la investigación era lo único capaz de mitigar su dolor; la misma que su marido le había hecho prometer que nunca abandonaría.

Durante la Primera Guerra Mundial, Curie creó una flota de estaciones de Rayos X, tanto fijas como móviles, para examinar las heridas de los soldados en el frente.

Nuevos fenómenos

La Universidad le ofreció el puesto de profesor vacante con la muerte de Pierre. En memoria de su marido, luchó para que el gobierno francés creara el Instituto Curie, todavía hoy uno de los principales centros de investigación radiológica en el mundo. Una institución sin ánimo de lucro, siguiendo el espíritu de los Curie, que se negaron a patentar sus descubrimientos y las técnicas desarrolladas para el aislamiento del radio, prefiriendo ponerlas a disposición de a comunidad científica mundial.

No todo fueron buenas noticias: la Academia Francesa de Ciencias la rechazó como miembro, y es difícil distinguir si lo hicieron por su condición de mujer o de extranjera. Más aún, en 1911 se descubrió que mantenía un romance con Paul Langevin, antiguo estudiante de Pierre y hombre casado. La prensa azuzó contra

ella a la opinión pública, y tuvo que abandonar su casa para esconderse de los ataques e insultos que recibía en la misma puerta. Ese mismo año llegaría el segundo Premio Nobel, esta vez de física, por el descubrimiento del radio y del polonio. En esta ocasión, fue personalmente a recogerlo a pesar de una debilidad creciente, que convertía su trabajo diario en una tarea hercúlea. En su discurso de aceptación habló de cómo "nos encaramos con un mundo de nuevos fenómenos pertenecientes a un campo que, a pesar de su cercanía con los campos de la física y la química, está bien definido por sí mismo". No olvidó mencionar a su marido: "siento que interpreto correctamente la intención de la Academia de Ciencias al asumir que esta alta distinción que recibo ha sido motivada por nuestro trabajo en común, y por lo tanto rinde homenaje a la figura de Pierre Curie".

Durante el viaje de Curie a Estados Unidos, el presidente Harding le hizo entrega de un gramo de radio puro, valorado en 100.000 dólares, conseguido gracias a la donación colectiva.

Reconocimiento y viajes

Los años posteriores su trabajo estuvo dedicado a los beneficios de la radiactividad en el campo de la salud. Cuando estalló la Primera Guerra Mundial, creó una flota de estaciones de Rayos X –200 fijas y 20 instaladas en vehículos– que pudieran utilizarse en el frente para examinar las heridas de los soldados.

Con la paz, regreso el trabajo cotidiano y la necesidad de obtener fondos. El dinero de los Nobel se había ido en financiar sus investigaciones; la búsqueda de dinero fue una constante en la vida de Marie, que en sus últimos años iba a utilizar para ello toda su fama e influencia. Fue una época de viajes y conferencias, a pesar de su mala salud, su añoranza del trabajo de laboratorio y su rechazo a "esa pasión por la publicidad que tiene dominado al mundo", según escribió a su hija Eve en 1929. Pero el objetivo era siempre su trabajo: en su viaje a Estados Unidos fue recibida como una celebridad, pero su verdadero interés era un objeto diminuto que le fue entregado por el presidente Harding: un gramo de radio puro, valorado en 100.000 dólares de la época, conseguido gracias a la donación colectiva organizada a nivel nacional por la periodista y feminista Marie Mattingly Meloney.

Marie pasó sus últimos años dirigiendo el Instituto del Radio. En 1934 fallecía de leucemia, enfermedad probablemente no ajena a todos los años que había trabajado expuesta a los mismos agentes radiactivos cuyas propiedades había investigado buscando mejorar la salud de los demás. Los años en que guardaba los recipientes con radio y polonio en el bolsillo de su chaqueta, y en que se extasiaba con aquel brillo mágico que emitían en la oscuridad. Por eso los trabajos biográficos sobre ella cuentan con el mérito adicional de acceder a sus papeles personales: sus cuadernos de trabajo, e incluso su libro de cocina, son radiactivos, y sólo se pueden consultar con una autorización previa y llevando la protección adecuada: y así seguirán durante bastante tiempo, si se considera que el tiempo medio de vida del radio-226, el isótopo más común en el radio, es de 1.600 años.

El grupo de trabajo encargado del proyecto del FORO ha contado la participación de expertos de sus países miembros y de un coordinador científico del OIEA

Cultura de Seguridad en las organizaciones, instalaciones y actividades con fuentes de radiación ionizante

El Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO) es una asociación creada en 1997, con el propósito de promover la seguridad nuclear, radiológica y física al más alto nivel en sus países miembros. En la actualidad, el FORO está integrado por los organismos reguladores de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, España, México, Perú y Uruguay (www.foroiberam.org).

El objetivo del FORO es mantener un marco de intercambio de información y experiencias, realizando actividades conjuntas y desarrollando un programa técnico de trabajo en temas de interés para sus miembros y coordinado con los planes del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), siendo éste su organismo científico de referencia.

El FORO concede especial importancia a la prevención en el campo de la protección y la seguridad radiológica así como de la seguridad física, reconociendo la importante contribución que tienen los factores humanos y organizacionales en ese terreno. De ahí que el FORO considere esencial que tanto las organizaciones como los trabajadores alcancen y mantengan una cultura de seguridad sólida.

Con el fin de promover y desarrollar una mayor Cultura de Seguridad (CS) en sus países miembros, el FORO decidió emprender el proyecto "Cultura de Seguridad en las organizaciones, instalaciones y actividades con fuentes de radiación ionizante". El grupo de trabajo encargado del proyecto ha contado con la participación de expertos de sus países miembros y de un coordinador científico del OIEA.

El proyecto ha tenido como objetivo inicial la elaboración de un documento que sirva de referencia a este tipo de organizaciones. El documento, partiendo de las bases teóricas de la CS, desarrolla las herramientas prácticas para evaluar su nivel en las instalaciones industriales, médicas y de investigación, en el manejo de los residuos radiactivos derivados de estas actividades y en el transporte de material radiactivo.

Texto **Ferro Fernández, R.[a], Cruz Suárez, R.[b], Arciniega Torres J[c], Blanes Tabernero, A.[d], Bomben, A.M.[e], Da Silva Silveira, C.[f], Ordoñez Gutiérrez, E.b, Perera Meas, J.F.[g], Ramírez Quijada, R.[h], Videla Valdebenito, R.[i]** | [a]Centro Nacional de Seguridad Nuclear, La Habana, Cuba; [b]Agencia Internacional de Energía Atómica, Viena, Austria; [c]Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, México DF, México; [d]Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid, España; [e]Autoridad Regulatoria Nuclear, Buenos Aires, Argentina; [f]Comisión Nacional de Energía Nuclear, Rio de Janeiro, Brasil; [g]Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección, Montevideo, Uruguay; [h]Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima, Perú; [i]Comisión Chilena de Energía Nuclear, Santiago, Chile |

Los enfoques de seguridad han experimentado una evolución similar en casi todos los sectores de la industria. De forma general, puede considerarse que han transitado por tres fases fundamentales: Fase Tecnológica, Fase de los Factores Humanos y Fase Organizacional. Estas tres fases han permitido conformar el marco conceptual actual para abordar la seguridad, integrando los aspectos de fiabilidad tecnológica, humana y organizacional.

A pesar de esta concepción integradora, los factores humanos y organiza-

El grupo de trabajo encargado del proyecto del FORO "Cultura de Seguridad en las organizaciones, instalaciones y actividades con fuentes de radiación ionizante" ha contado con la participación de expertos de sus países miembros y de un coordinador científico del OIEA.

cionales continúan teniendo la mayor incidencia en la ocurrencia de accidentes, con una estimación cercana al 80-90% de los casos, en diferentes sectores.

La experiencia demuestra cómo comportamientos inadecuados de individuos u organizaciones pueden erosionar o inhabilitar, de forma poco visible, las barreras y medidas de control destinadas a la prevención de accidentes, incluso, desde mucho antes de que éstos se produzcan.

El modelo de Reason sobre la anatomía del accidente organizacional, conocido también como el modelo del 'Queso Suizo', muestra la disposición de las barreras sucesivas entre el peligro y los elementos vulnerables, y cómo estas barreras se van deteriorando, produciéndose huecos que si permanecen mucho tiempo sin resolverse pueden provocar un alineamiento entre ellos, que permitirá el paso del peligro hasta provocar el daño o perdida indeseada. La CS puede contribuir a evitar o eliminar estos huecos, los sucesos radiológicos ocurridos en las últimas décadas confirman esta realidad.

Al igual que los enfoques de seguridad, la comprensión y el tratamiento de los factores humanos también han evolucionado. Hoy las estrategias para reducir el impacto de los factores humanos en los problemas de seguridad enfatizan el logro de comportamientos y actitudes en individuos y organizaciones que reflejen un alto compromiso y responsabilidad con la seguridad y es ésta la esencia de la CS, una de las tareas más complejas y urgentes a enfrentar en el campo de la prevención.

Varios documentos y eventos internacionales han reconocido la contribución que han tenido los problemas de CS en la ocurrencia de sucesos radiológicos, y lo han recogido en documentos relevantes del sector. Sin embargo, solo en fecha relativamente reciente se han iniciado algunos esfuerzos internacionales en este terreno.

El objetivo general del documento del FORO es proporcionar un marco para la introducción y la aplicación práctica del concepto de Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación, considerando las particularidades de la protección y la seguridad radiológica y física.

El documento consta de 10 capítulos en su cuerpo principal, complementados por tres apéndices y cinco anexos, agrupados conceptualmente como se representa en la **Figura 1.**

Algunos elementos innovadores son introducidos en el documento incluyendo propuestas para la evaluación de la CS, Indicadores de CS, asi como la CS en el organismo regulador. El análisis del impacto de la Cultura de Seguridad en la ocurrencia de accidentes radiológicos y las prácticas para su fomento y desarrollo son descritas en los apéndices y anexos.

En el capítulo correspondiente a los aspectos teóricos de la cultura se presentan las diferentes definiciones de la misma. Una de las definiciones más simples y difundidas es la que considera la cultura como *"la forma en que hacemos las cosas"*. De las muchas definiciones existentes, la que más se ha referenciado en el desarrollo del concepto de CS es, probablemente, la del psicólogo social Edgar Schein, que expresa:

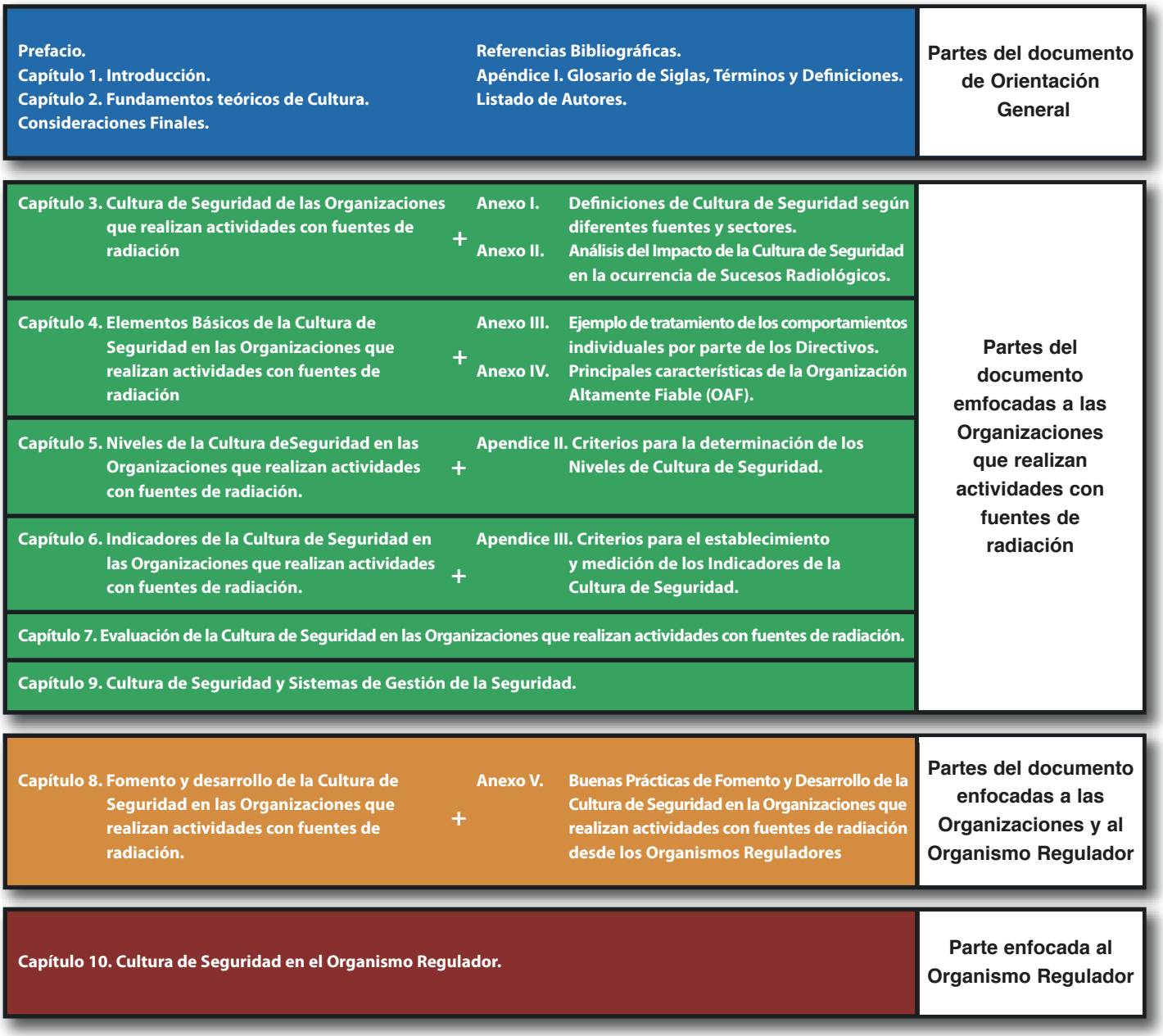


Figura 1. Estructura del documento del FORO sobre Cultura de Seguridad

Figura 2. Las Manifestaciones Visibles de la Cultura son apenas la punta de un Iceberg.

"La cultura es un patrón de suposiciones básicas inventadas, descubiertas o desarrolladas por un grupo dado según las fue aprendiendo al enfrentar los problemas de la adaptación externa (la supervivencia) y de la integración interna (la convivencia) que ha evolucionado con el tiempo y se ha trasmitido de generación en generación".

Según el modelo de Edgar Schein, la cultura en las organizaciones opera en tres niveles:

- Manifestaciones Visibles (lo que se percibe).
- Valores Declarados (lo que se expresa).
- Suposiciones Básicas (creencias fundamentales).

Lo que frecuentemente percibimos es sólo una parte insignificante de todo lo que implica la cultura, en forma similar a un iceberg, como aparece representado en la **Figura 2.** El cambio cultural se produce, fundamentalmente, cuando se modifican las Suposiciones Básicas, "los porqués" de los comportamientos. Sin embargo, esto no significa que no se deba incidir en el resto de los niveles, ya que cada uno de ellos, en diferente magnitud, puede tener un efecto regulador o modificador en la misma.

> *El objetivo general del documento del FORO es proporcionar un marco para la introducción y la aplicación práctica del concepto de Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación*

El capítulo dedicado a la Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación describe cómo a partir del accidente de Chernóbil, lograr una cultura de seguridad sólida ha sido considerado un principio básico de seguridad en las instalaciones nucleares. Sin embargo, en las actividades con fuentes de radiación ha sido un tema poco desarrollado, siendo muy escasa

Figura 3. Los 10 Elementos Básicos de la Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación.

la literatura sobre aplicaciones prácticas en este campo.

Aparece mencionada, como requerimiento o recomendación, en los requisitos de gestión relativos a las prácticas con fuentes de radiación en las Normas Básicas de Seguridad , manteniéndose en la revisión posterior de estas Normas en el 2014, y en los requerimientos generales de seguridad sobre Sistemas de Gestión del OIEA,y en las Publicaciones 103 y 112 de la ICRP.

La Cultura de Seguridad también ha sido considerada como un elemento importante dentro de las estrategias de algunos Organismos Internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), el OIEA, cuyo Grupo Internacional Asesor en Seguridad Nuclear (GIASN) lo abordó en su Reporte INSAG 11 y la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA).

Al igual que sucede con la definición de cultura, existen numerosas definiciones de CS y en todas la esencia es la misma, la atención prioritaria hacia la seguridad con el enfoque *"la seguridad primero"*. Toda organización que realiza actividades con riesgos la posee, aunque sea en niveles mínimos. Sin embargo, cuando se trabaja en su fomento y desarrollo en una organización, se trata de lograr el nivel más elevado posible de la misma y que algunos autores denominan cultura de seguridad sólida, positiva, saludable, robusta o fuerte y que en el marco del documento del FORO se denomina 'cultura de seguridad sólida'.

El capítulo que describe los elementos básicos de la cultura de seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación señala cómo, tras un análisis de los diferentes enfoques en varias industrias, se acordó considerar en el documento del FORO un total de **10 Elementos Básicos.**

Estos 10 Elementos Básicos están estrechamente relacionados entre sí y deberán estar presentes en conjunto para lograr una cultura de seguridad sólida en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación, como se representa en la **Figura 3.**

Respecto al capítulo que hace referencia a los niveles de la Cultura de Seguridad, se ha desarrollado un esquema de 4 niveles en los que puede encontrarse una organización que realiza actividades con fuentes de radiación, como se representa gráficamente en la **Figura 4.**

La aplicación práctica de estos niveles es muy útil ya que sirve para comparar, a través de sucesivas evaluaciones, el progreso experimentado en CS por parte de la organización.

El capítulo de los indicadores de la Cultura de Seguridad constituye uno de los temas más complejos en este campo, dada la dificultad en todo lo referente a su evaluación y medición. Sin embargo es necesario disponer de algún tipo de indicador que pueda monitorear su estado para reconocer el progreso o el deterioro de la misma, ya que no es posible mejorar lo que no se puede medir o evaluar. El monitoreo de la CS a través de indicadores permite identificar tendencias que resultan muy beneficiosas para alertar tempranamente sobre su posible deterioro.

En el documento se propone un total de **62 indicadores** para los **10 Elementos Básicos.** Este listado no pretende ser absoluto o completo ya que las particularidades de una organización pueden requerir otros indicadores específicos o modificar algunos de los propuestos. Esta propuesta puede servir para la creación y mantenimiento de las bases de datos adecuadas para estos tipos de indicadores, y que son diferentes a los datos que tradicionalmente se registran en las organizaciones.

El capítulo de la evaluación de la Cultura de Seguridad indica que este es un proceso imprescindible para poder diagnosticar su estado y decidir las acciones para su mejora. Esta evaluación es compleja por dos razones fundamentales:

• La importancia que tienen en la CS los factores que yacen en su nivel más profundo, es decir, las suposiciones básicas, generalmente invisibles y en ocasiones inconscientes, pero que es necesario revelar y descifrar desde la

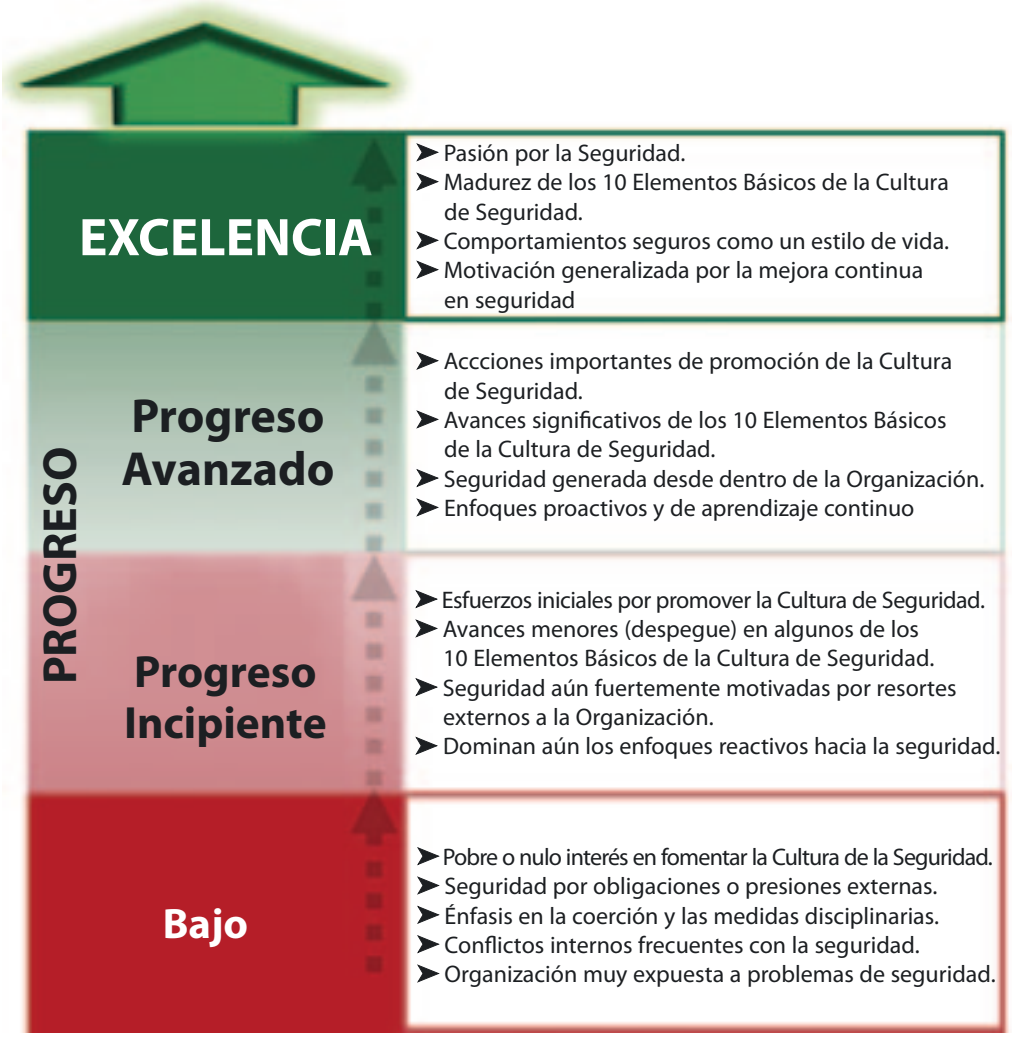


Figura 4. Niveles de Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación.

Figura 5. Los 10 Elementos Básicos de la Cultura de Seguridad en el Organismo Regulador.

perspectiva cultural, para lograr una evaluación real; y

• El carácter intangible de los elementos de la CS tales como los compromisos, las actitudes, los valores, la motivación y la prudencia con respecto a la seguridad, entre otros, que no permiten una evaluación directa y que puede generar incertidumbres durante la evaluación.

Para resolver esta situación se aplican enfoques y métodos que permiten, a partir de la evaluación de elementos tangibles y directamente medibles, llegar a conclusiones sobre los elementos intangibles de la misma.

La evaluación puede ser realizada por la propia organización (autoevaluación) o por una organización externa (evaluación externa). La elección de una u otra vía es una decisión que corresponde a la organización y estará determinada, fundamentalmente, por la disponibilidad de personal y recursos para este proceso.

En ambos casos, el apoyo y compromiso de la Alta Dirección con la evaluación será un factor decisivo para su éxito, ya que asegurará y viabilizará los recursos necesarios para las actividades previstas y la implementación del Plan de Acción de mejoras que se elabore.

En el documento se desarrollan las fases del proceso de evaluación y las técnicas que se utilizan.

Las cinco técnicas descritas son la revisión documental, la observación de procesos, las encuestas, las entrevis-

tas y los grupos focales. Cada una de las técnicas tiene sus particularidades con ventajas y desventajas, enfatizándose que la aplicación de una sola técnica no es suficiente para alcanzar conclusiones adecuadas. Por ello, es necesario aplicar de manera combinada y cruzada varias o todas estas técnicas, pues cada una tiene una efectividad diferente para revelar o descifrar aspectos de la CS.

Es recomendable que el diseño, la estructura y la aplicación de las técnicas de evaluación se organicen coherentemente, optimizando los recursos y asegurando la máxima efectividad.

Respecto al capítulo de fomento y desarrollo de la Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación se establece que en el campo de la seguridad, no se puede esperar que ocurran eventos o accidentes para que se produzca un cambio cultural, sino que es necesario actuar de forma proactiva para alcanzar los niveles necesarios de la misma, que eviten tales sucesos. Este proceso se denomina *"Fomento y Desarrollo de la Cultura de Seguridad"*.

Esta labor de fomento y desarrollo debe llevarse a cabo, en primera instancia, por la propia organización. Sin embargo, existen otros factores externos que pueden contribuir o influir positivamente, favoreciendo el cambio cultural deseado.

Esos factores externos son, por ejemplo, el gobierno, los organismos reguladores, las sociedades profesionales, las instituciones u organizaciones de formación y capacitación de los profesionales y técnicos para el sector, y las Partes Interesadas pertinentes (*Stakeholders*).

Por ello, puede considerarse de forma general, que existen dos vías para fomentar la CS, la acción interna de la propia organización y la acción de agentes externos.

El apoyo y compromiso de la Alta Dirección con la evaluación de la Cultura de Seguridad será un factor decisivo para su éxito, ya que asegurará los recursos necesarios para las actividades previstas y la implementación del Plan de Acción de mejoras que se elabore

En el documento del FORO también se proporciona información para elaborar e implementar un **Programa de Fomento y Desarrollo de la Cultura de Seguridad (PFD-CS),** que es una forma de organizar e integrar los esfuerzos que necesita realizar una organización para lograr desarrollar los comportamientos y las actitudes necesarias en sus directivos y trabajadores con respecto a la seguridad.

El cambio propuesto requiere que las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación, los organismos reguladores y las partes interesadas pertinentes tengan una comprensión clara del significado de la cultura de seguridad

En el capítulo de Cultura de Seguridad en el organismo regulador se indica que este concepto es aún un tema en desarrollo, siendo muy pocos los organismos reguladores que han implementado programas o han iniciado acciones con ese objetivo. En general, los principios y enfoques existentes sobre CS en las organizaciones se aplican al ámbito de los organismos reguladores. Sin embargo, la misión y naturaleza de las actividades que realiza un organismo regulador incorporan particularidades que debe tenerse en cuenta.

Los **10 Elementos Básicos** de la Cultura de Seguridad en el organismo regulador que se han establecido en el documento son los representados en la **Figura 5.**

Estos **10 Elementos Básicos** deben estar estrechamente relacionados entre sí para lograr una cultura de seguridad sólida.

Las consideraciones finales señalan que alcanzar y mantener una cultura de seguridad sólida en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación es actualmente, y continuará siendo en el futuro, una prioridad para garantizar la optimización de la protección y la prevención de incidentes y sucesos radiológicos.

Ello significa una continua mejora de las actitudes y los comportamientos de las organizaciones, sus directivos y trabajadores con respecto a la seguridad, a partir del desarrollo y la consolidación de creencias y valores compartidos acerca de que la *"seguridad es siempre lo primero"*.

Ese cambio o mejora cultural requiere que las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación, los organismos reguladores y las partes interesadas pertinentes tengan una comprensión cla-

ra del significado de la cultura de seguridad, de los Elementos Básicos que la caracterizan y de las formas y los métodos para fomentarla, evaluarla, monitorearla y mejorarla continuamente, según le corresponda a cada uno.

A las organizaciones les corresponde la responsabilidad directa por alcanzar y mantener el más alto nivel de CS, a los organismos reguladores les corresponde la labor de promover, motivar, apoyar y velar para que las organizaciones logren ese fin; y la responsabilidad de lograr una cultura de seguridad sólida internamente. Por último, corresponde a las partes interesadas contribuir a ese propósito desde sus posiciones y posibilidades.

Para contribuir a alcanzar y mantener una cultura de seguridad sólida, el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Nucleares y Radiológicos ha elaborado un documento, basado en el estado del arte en este campo, las experiencias y desarrollos en el sector nuclear así como en los avances más actuales de otros sectores de la industria y los servicios no-nucleares, que son aplicables. El documento es uno de los primeros en desarrollar el tema de la CS en el sector radiológico, con aspectos conceptuales específicos y recomendaciones prácticas para su fomento y desarrollo. Además, integra bajo una misma CS las formas de hacer y comportarse con respecto a los aspectos radiológicos y de la seguridad física de fuentes, al asumirlos indisolublemente unidos, y también proporciona un marco conceptual para la CS en el organismo regulador.

Por todo ello, el documento del FORO, puede constituir una referencia de gran utilidad para toda la región de Iberoamérica y para instituciones u organizaciones de otras partes del mundo para alcanzar y mantener una cultura de seguridad sólida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A continuación se presentan solo las referencias del documento del FORO que han sido mencionadas en esta publicación.

[1] FORO IBEROAMERICANO DE ORGANISMOS REGULADORES NUCLEARES Y RADIOLÓGICOS, Proyecto "Cultura de Seguridad en las actividades con fuentes de radioaciones ionizantes", La Habana (2012).

[2] REASON, J., Human Error, Cambridge University Press, Manchester (1996).

[3] REASON, J., Managing the Risks of Organizational Accidents, Ashgate publishing limited, Aldershot (2004).

[4] INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION, IRPA Guiding Principles for Establishing a Radiation Protection Culture (2014).

[5] GIOT, M., et al,Training Schemes on Nuclear Safety Culture for Managers: the Trasnusafe project IOT Trasnusafe, (2012). Disponible en :http://www.enen-assoc.org/data/document/full-paper-topsafe-2012-final.pdf.

[6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Proyecto de Cooperación Técnica " Fortalecimiento y actualización de las competencias técnicas para la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos ocupacionalmente a la radiación ionizante", RLA/9/066,Viena (2012)

[7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Proyecto de Cooperación Técnica "Fortalecimiento de la infraestructura nacional para el cumplimiento de las reglamentaciones y requerimientos en materia de protección radiológica para usuarios finales", RLA/9/075, Viena (2014)

[8] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series 115, (1996).

[9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiacion Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3, IAEA,Vienna (2014).

[10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-3, IAEA, Vienna (2006).

[11] INTERNATIONAL COMMISSION FOR RADIATION PROTECTION, Recommendations, ICRP 103, (2007).

[12] INTERNATIONAL COMMISSION FOR RADIATION PROTECTION, ICRP Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies, ICRP 112, (2009).

[13] INTERNATIONAL NUCLEAR ADVISOR SAFETY GROUP, The Safe Management of Sources of Radiation: Principles and Strategies, INSAG-11, IAEA, Vienna (1999).

[14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna (2006).

[15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 1, IAEA, Vienna (2010).

R A D I O G R A F Í A

Fabricación de radiofármacos PET con ciclotrón en España

Texto **María Luz Rodríguez** | Área de Instalaciones Radiactivas Industriales | **Arturo Pérez** | Área Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas |

Los radiofármacos son compuestos farmacológicos de moléculas biológicamente activas con un isótopo radiactivo. La presencia del isótopo radiactivo tiene objetivo diagnóstico o terapéutico, mientras que el resto de la molécula gobierna la interacción fisiológica y química del fármaco dirigiendo su difusión y fijación en los tejidos u órganos deseados.

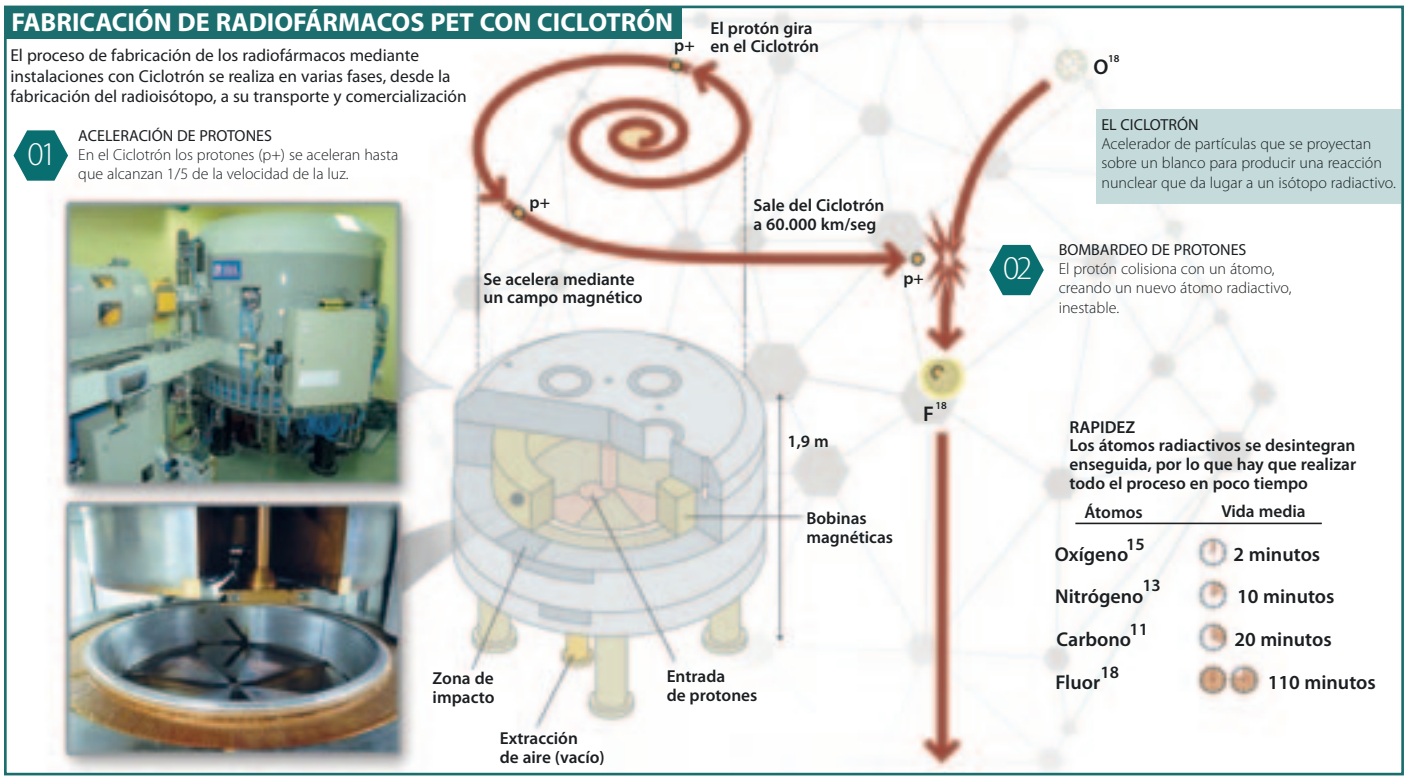
Para uso terapéutico se utilizan radioisótopos generalmente emisores alfa o beta de corto alcance, de forma que el radiofármaco fijado en la zona a tratar, emite radiación que tiene como objeto destruir o reducir las células afectadas.

Para uso diagnóstico se utilizan emisores radiactivos de largo alcance, generalmente de radiación gamma, de forma que su emisión es detectada por los equipos de imagen médica, fuera del paciente. La adecuada combinación de la molécula portadora y del tipo de radioisótopo permite obtener imágenes funcionales de diferentes tejidos y procesos que no se pueden obtener mediante las técnicas tradicionales de imagen médica.

El decaimiento radiactivo de los isótopos requiere generalmente una fabricación del radiofármaco próxima al punto de uso y una aplicación rápida del mismo. En esta breve 'radiografía' nos vamos a centrar en la fabricación mediante ciclotrón de los radiofármacos empleados para obtener imágenes PET (Tomografía por Emisión de Positrones).

El proceso

El proceso de fabricación y comercialización de los radiofármacos mediante



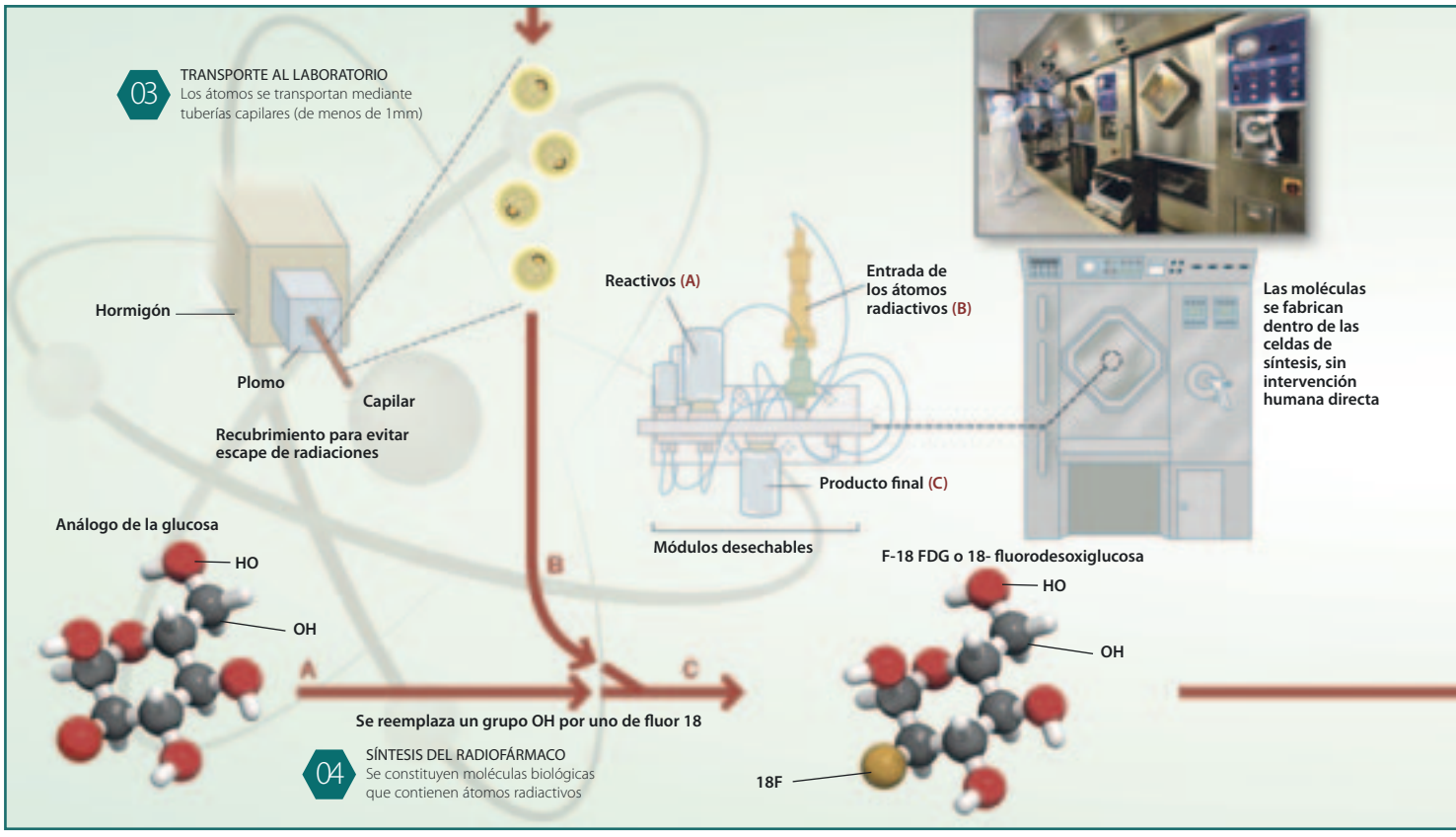
instalaciones con ciclotrón se desarrolla en diversas fases, que configuran las distintas dependencias de la instalación: en primer lugar se fabrica el radioisótopo, en el ciclotrón; en segundo lugar se sintetiza el radiofármaco completo en las celdas de síntesis y se dispensan en viales; y, finalmente, tras un control de calidad del producto, se preparan los bultos para el transporte y comercialización.

Para describir el proceso, vamos a fijarnos en la producción del denominado 18F-FDG o 18-fluorodesoxiglucosa. Este radiofármaco es un análogo de la glucosa en el que se sustituye un grupo hidroxilo (OH^-) por un flúor-18, que decae radiactivamente con emisión de positrones, que a su vez se aniquilan al colisionar con electrones del tejido circundante emitiendo radiación gamma. Al inyectar el radiofármaco 18F-FDG al paciente, este se distribuye en el organismo de forma similar a como lo haría la glucosa ordinaria, esencialmente concentrándose en aquellos tejidos y órganos con mayor actividad metabólica. La detección mediante equipos PET de la emisión gamma resultante ofrece información funcional, permitiendo detectar focos de inflamación o neoplasias, con actividad metabólica exacerbada.

El ciclotrón utiliza campos magnéticos para acelerar iones, típicamente protones, en un circuito circular, de manera que alcancen una energía suficiente para que al bombardear con ellos una sustancia blanco se induzca una reacción nuclear que convierte átomos del blanco en el isótopo radiactivo deseado.

En el caso de 18F-FDG, se bombardea con protones agua enriquecida en oxígeno-18 para convertirlo en flúor-18, mediante la sustitución de un neutrón por un protón. Esta reacción libera, junto a otra radiación, neutrones de alta energía que deben ser detenidos mediante los blindajes adecuados, lo que hace que las salas de ciclotrón tengan altos requisitos de protección radiológica y de blindaje contra las radiaciones típicamente consistente en dos metros de hormigón. Este proceso dura unas dos horas, por lo que los turnos suelen comenzar de madrugada de forma que el fármaco esté preparado para su distribución y uso a primera hora de la mañana. El isótopo resultante, flúor-18, tiene una vida media de casi dos horas.

El radioisótopo recién fabricado se transporta automáticamente al interior de las denominadas celdas de síntesis. Estos cubículos, convenientemente blindados para evitar la irradiación de los técnicos que las operan, y con sistemas de acondicionamiento de aire adecuados que compatibilizan las necesidades de protección radiológica y de calidad farmacéutica



del ambiente, permiten realizar de forma semi o completamente automática el denominado proceso de síntesis del radiofármaco, que une el radioisótopo a la molécula que aporta el soporte funcional.

En este caso, el proceso químico de síntesis –que dura aproximadamente media hora– permite producir el compuesto químico denominado fluorodesoxiglucosa (2-fluor-2-desoxi-D-glucosa) en el que el lugar del grupo hidroxilo (OH^-) en la posición 2' de la glucosa análoga está ocupado por el radioisótopo activo de flúor-18.

De las celdas de síntesis se transfiere el radiofármaco a las celdas de dispensación donde se introduce en viales que posteriormente se acondicionarán en bultos blindados para su transporte y distribución. Una alícuota del producto se analiza en el laboratorio de control de calidad para confirmar la correcta síntesis del producto.

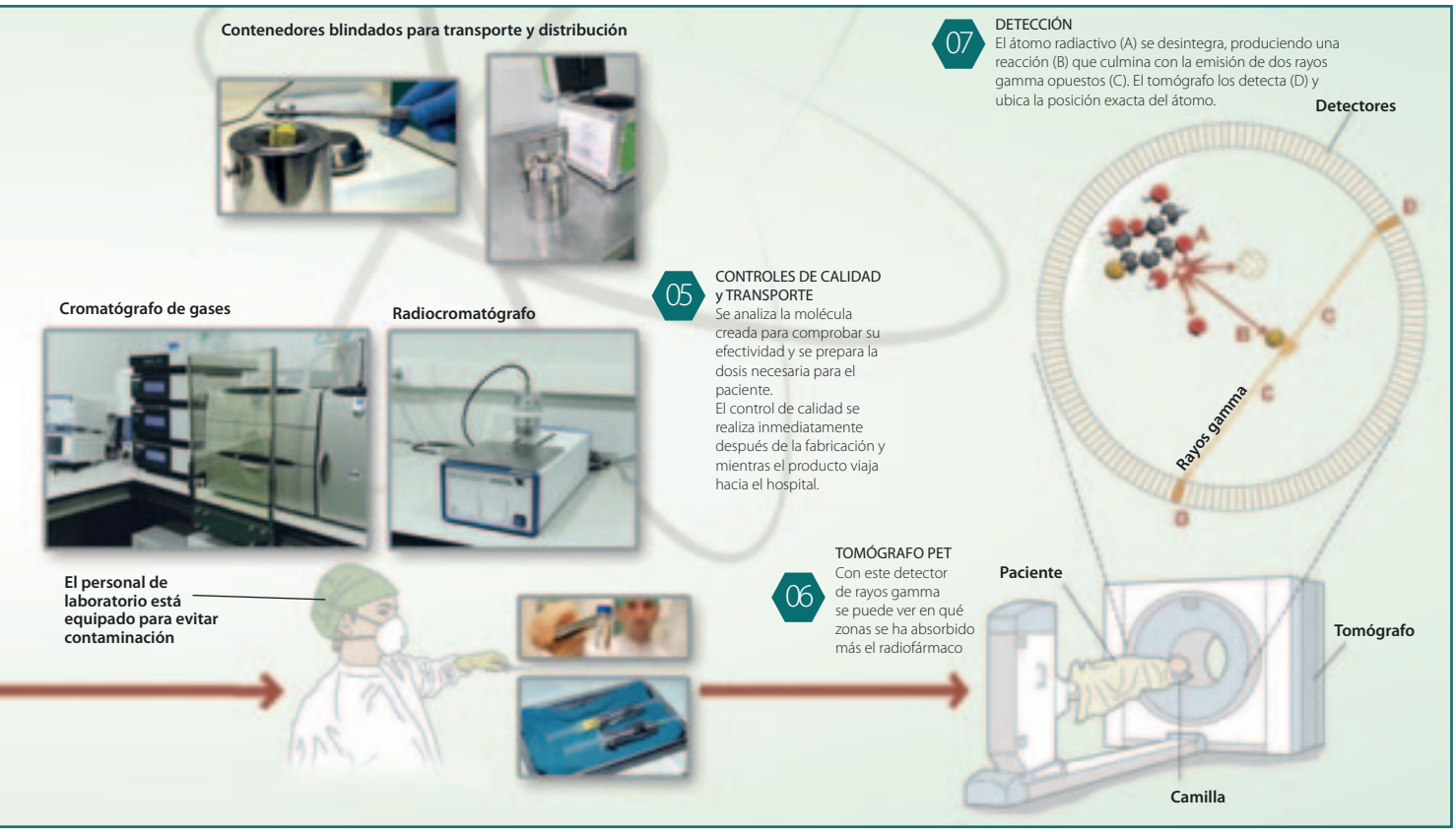
Los contendores blindados y acondicionados en el bulto de transporte serán remitidos a los servicios de medicina nuclear donde el radiofármaco será empleado para la realización de imágenes PET.

Repartidas por toda España existen actualmente en funcionamiento 14 instalaciones de fabricación de radiofármacos con ciclotrón, que abastecen a todo el país, incluyendo los hospitales insulares, y exportan a Portugal.

Además del 18F-FDG descrito, las instalaciones con ciclotrón en España disponen de licencia para fabricar otros radiofármacos por procesos similares, con aplicaciones tanto diagnósticas como terapéuticas, incluyendo otros radioisótopos como el carbono-11. En algunos casos se realiza el proceso completo en la instalación (fabricación del radioisótopo en el mismo ciclotrón y posterior síntesis del radiofármaco), mientras que en otros sólo se realiza la fase de síntesis aprovechando las celdas antes descritas, incorporando radioisótopos adquiridos fuera de la instalación.

Mirando al futuro

Además de la producción de radiofármacos descrita, conviene destacar dos evoluciones tecnológicas del uso médico de ciclotrones aun no autorizadas en España. Por un lado, se está investigado muy activamente en el desarrollo de ciclotrones de menor tamaño con el objeto de que estén situados en los propios hospitales, lo que permita la síntesis de radiofármacos de vida media muy corta, para los que el transporte es inadmisible pues perderían toda su actividad, para su uso inmediato *in situ*; por otro lado, aunque no relacionado directamente con los radiofármacos, la tecnología de aceleración de iones mediante ciclotrones se está usando para tratar tumores en instalaciones de protonterapia o ionterapia.



Los satélites Sentinel revolucionan la observación medioambiental

Centinelas en órbita para estudiar, vigilar y gestionar el planeta Tierra

Europa tiene en órbita, en la actualidad, tres satélites Sentinel, que son la columna vertebral de su ambicioso sistema Copérnico, puesto en marcha para revolucionar la observación medioambiental, tanto en su vertiente científica como en el caso de la gestión y de sus aplicaciones comerciales.

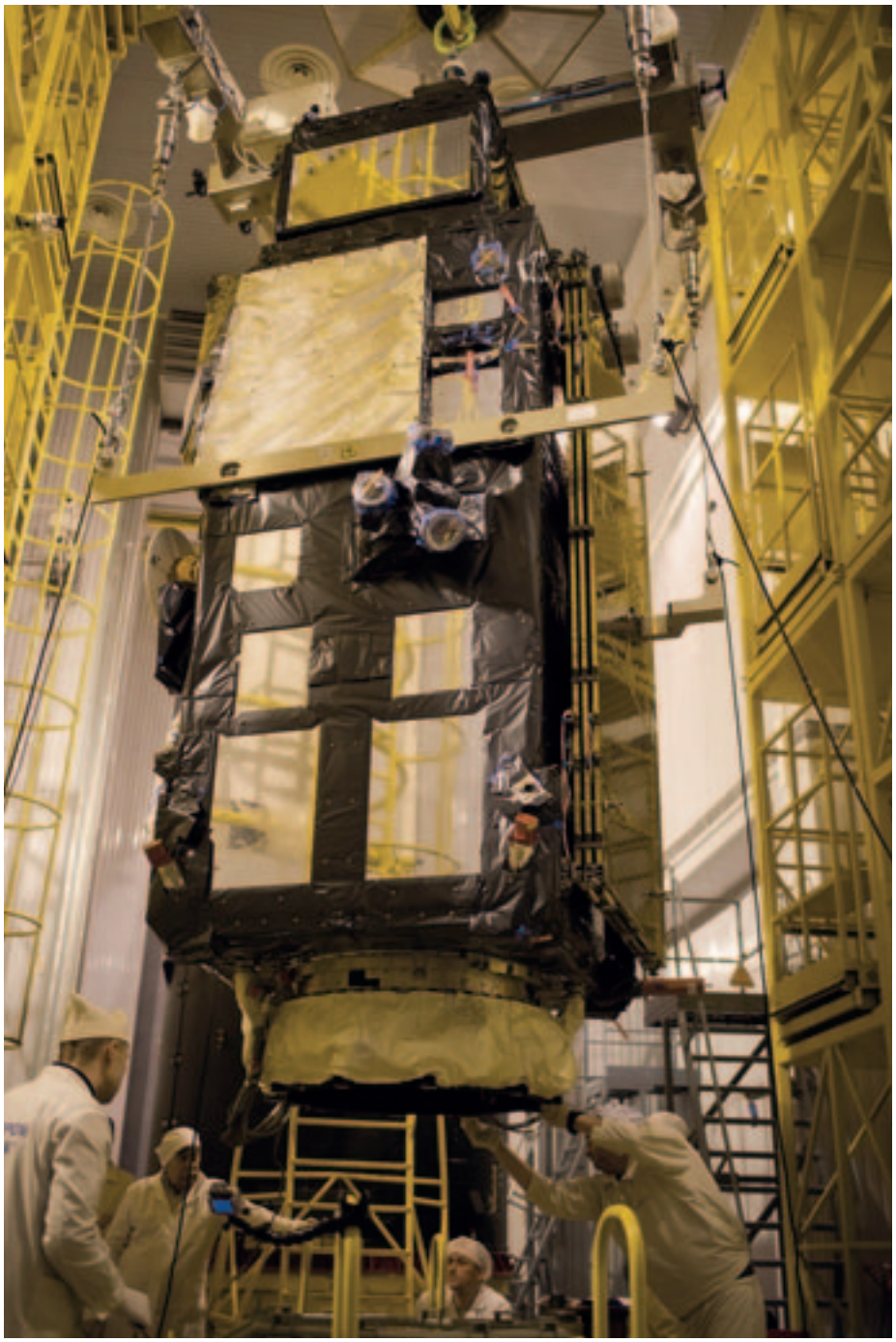
Texto **Alicia Rivera** | Periodista científica |

España, Portugal y la zona noroccidental de Marruecos fueron fotografiadas desde el espacio con el nuevo satélite europeo de observación de la tierra Sentinel-3A, un par de semanas después de ser colocado en órbita. La imagen, captada el pasado uno de marzo, fue una de las primeras tomadas por un instrumento diseñado para registrar el color de los océanos y de la tierra firme, y se distinguen en ella las cumbres nevadas de las cordilleras en la península Ibérica y en Marruecos, el árido desierto amarillento en el norte de África y el verdor del territorio en amplias zonas de Portugal y España; remolinos de sedimentos y algas en el mar se aprecian en el lado atlántico del estrecho de Gibraltar y extendiéndose a lo largo de la costa marroquí.

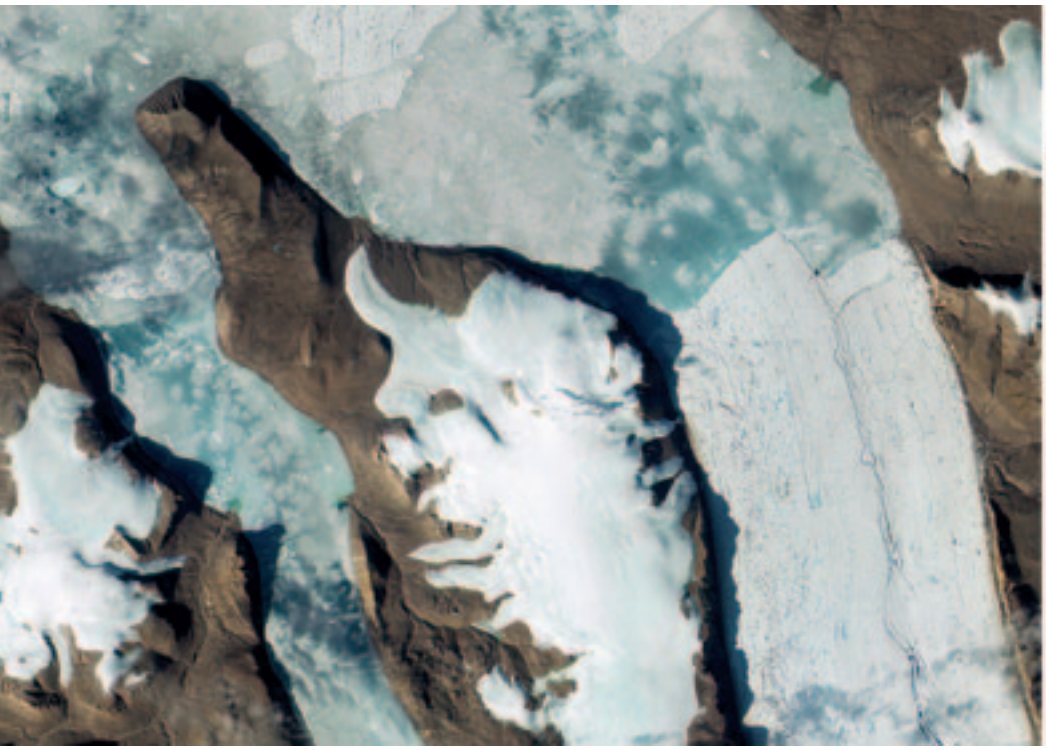
"Las primeras imágenes revelan la auténtica versatilidad del Sentinel-3A", destacó Volker Liebig, director de los programas de observación de la Tierra de la Agencia Europea del Espacio (ESA), adelantando la amplia variedad de aplicaciones de esta misión espacial, que abarca "desde medir la actividad biológica marina hasta proporcionar información sobre el estado de la vegetación". La ESA resume las capacidades de los instrumentos de observación (cuatro) que lleva a bordo este nuevo satélite: "Medirá sistemáticamente los océanos, la superficie terrestre, los hielos y la atmósfera de la Tierra con el fin de supervisar dinámicas globales a gran escala y ofrecer información esencial en tiempo real para la predicción del tiempo y de los océanos". Además, registrará los incendios, ayudando no solo a cartografiar las emisiones de carbono de la combustión de biomasa, sino también a evaluar los daños y la recuperación de zonas quemadas.

El Sentinel-3A, un satélite de 1.150 kilos y el tamaño de un coche utilitario, operando en órbita polar alrededor de la Tierra a una altura de 815 kilómetros sobre la superficie, es una de las piezas clave del programa Copérnico que ha puesto en marcha la ESA con la Comisión Europea. El objetivo es captar ingentes cantidades de datos sobre el planeta Tierra necesarios para avanzar en la investigación de los océanos, del cambio climático, de la evolución de los hielos, los usos del suelo, la atmósfera, etcétera. Pero también para suministrar información valiosa a innumerables aplicaciones relacionadas con la gestión del territorio y de los mares tanto por parte de las administraciones como del sector privado.

La predicción meteorológica apoyada en medios espaciales es esencial en un sinfín de actividades (desde el transporte



El Sentinel-3A con la Tierra al fondo de la ilustración. Arriba, instalación del satélite en el cohete Rockot, en el cosmódromo de Plesetsk (norte de Rusia).



En la foto del la página anterior, una amplia zona del glaciar Ryder. A la derecha, las islas Canarias.

Una familia de satélites de observación de la Tierra

Sentinel-1. Es una misión radar en órbita polar para estudiar la superficie de la tierra y los océanos en cualquier condición meteorológica, de día y de noche.
Sentinel-2. Misión multiespectral de alta resolución en órbita polar diseñada para monitorizar la superficie terrestre estudiando la cubierta vegetal, los usos del terreno y de las aguas, los cauces navegables y las zonas costeras.
Sentinel-3. Transporta distintos instrumentos para medir la elevación, la temperatura o el color de la tierra y de los océanos con gran precisión y fiabilidad.
Sentinel-4. Es un conjunto de instrumentos que irá embarcado en un satélite Meteosat de tercera generación para monitorizar la atmósfera de nuestro planeta desde un órbita geoestacionaria.
Sentinel-5. Vigilará las concentraciones de gases traza y aerosoles en la atmósfera y también irá embarcado en un satélite MetOp en órbita polar.
Sentinel-5 Precursor. Se trata de una misión de monitoreo atmosférico concebida para reducir las interrupciones de datos entre el satélite Envisat y el Sentinel-5.
Sentinel-6. Llevará un láser altímetro para medir la altura global de la superficie del mar especialmente para oceanografía operacional y estudios del clima.

a la agricultura o el turismo). Ahora se trata de ir mucho más lejos en la utilización de la información sobre el planeta. "En meteorología, los satélites han estado proporcionando datos fiables para el pronóstico del tiempo durante más de 30 años", recordó Liebig tras el lanzamiento del primer satélite de la familia, el Sentinel-1A. "Con el programa Copérnico, ahora tendremos una fuente de información similar para servicios medioambientales, así como para aplicaciones en seguridad y en el ámbito de la respuesta ante desastres", añadió.

El Sentinel-3A, que empezará a funcionar de modo rutinario este verano, tras los meses de pruebas y calibraciones, y que debe estar operativo como mínimo siete años ampliables, es toda una novedad por los diferentes instrumentos de alta tecnología de observación que lleva a bordo. Pero no es el primer satélite de Copérnico. Y el conjunto del sistema es precisamente lo que lo convierte en "el programa de observación de la Tierra más ambicioso de la historia, diseñado para proporcionar in-

Ingenieros del Sentinel-3A, durante el lanzamiento el pasado 16 de febrero.

formación precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente", señala la ESA.

Información desde el espacio

Copérnico, programa denominado GMES (Global Monitoring for Environment and Security) en su fase de desarrollo, y el sistema de localización por satélite Galileo (el GPS europeo, que está desplegándose) son los dos grandes proyectos de la Comisión Europea (CE) en colaboración con la ESA. También participa Eumetsat, el organismo europeo para la explotación de satélites meteorológicos. El sistema incluye otros medios de observación, además de los satélites, así como la red de recepción y distribución de datos y, mientras la agencia espacial se encarga de los medios espaciales, la CE gestiona el servicio. La UE tiene presupuestados 4.300 millones de euros en el ejercicio 2014-2020 (para su operación se han estimado casi 700 millones anuales). El acceso a los datos en bruto es libre y gratuito para los países europeos, así como para otros, como Estados Unidos tras el acuerdo firmado en octubre del año pasado. La ESA, para el desarrollo y construcción de los satélites ha invertido 1.600 millones de euros desde 2005, a los que hay que sumar 600 millones de la Comisión Europea.

El Sentinel-1A, con un radar avanzado capaz de captar cualquier superficie de la tierra de día y de noche, con nubes o sin ellas, fue puesto en órbita en abril de 2014. El Sentinel-2A, con una cámara multiespectral de alta resolución, salió al espacio en junio de 2015. Estos satélites llevan la letra A porque tienen al menos un compañero gemelo, los B, con los lanzamientos planeados para este mismo año (los dobles del 1 y el 2) y para finales de 2017 (el Sentinel-3B). Cada pareja debe estar en órbita con una separación de 180 grados para ofrecer una rápida cobertura de todo el planeta. Con seis satélites Sentinel en órbita, se enviarán a la Tierra ocho terabytes de información cada día, según estimaciones de la Comisión Europea que recoge Spacenews.

> *El Sentinel 3-A, que funcionará a pleno rendimiento este verano tras cuatro meses de pruebas y calibraciones, estará operativo durante siete años*

"La diferencia principal entre Sentinel-3 y los dos previos otros es que, mientras el 1 y el 2 son mono-instrumento, el Sentinel-3 lleva embarcado cuatro instrumentos para componer dos misiones de observación en una, generando datos que serán combinados de manera sinérgica", resumía en Infoespacial.com José Morales, ingeniero español que dirige el segmento operacional de las misiones Copernico/Sentinel en ESOC, el centro de operaciones espaciales de la ESA, en Darmstadt (Alemania).

El coste de los dos Sentinel-3A asciende a 575 millones de euros y en su construcción han participado 60 empresas de toda Europa, bajo la dirección de Thales Alenia Space (en Francia) como contratista principal, incluidas 11 españolas (13, con las implicadas en el desarrollo de los equipos en tierra). Y este mismo año se ha aprobado la construcción de otras dos unidades, la C y la D, con un coste cada uno de 225 millones de euros. Cabe destacar que los Sentinel-3 C y D, llevarán "un sistema de posicionamiento compatible con al constelación Galileo, mientras que el A y el B llevan el compatible solo con GPS", apunta Morales.

Una de las primeras y espectaculares imágenes captadas por el Sentinel-3A mostraba una larga fractura en la capa helada en la zona oriental de la península Antártica, una raja en el hielo de dos kilómetros de ancho, que supera los cuatro en algunos tramos. Y otro equipo a bordo, el altímetro radar SRAL, también en los pri-

Presencia de empresas españolas en el programa europeo

Muchas de las tecnologías que exige el programa europeo Copérnico están entre los puntos fuertes de la industria espacial española, pequeña en comparación con los gigantes alemán y francés, pero respetada y solicitada en cualquier proyecto que emprende la Agencia Europea del Espacio (ESA).

Copérnico (antes denominado GMES) forma parte de los programas opcionales de la ESA, es decir, que los países miembros no están obligados a contribuir a su financiación, sino que cada uno participa en los diferentes proyectos en función de sus intereses específicos. Solo el programa científico y los gastos generales son obligatorios para los 22 países miembros, y cada país paga su cuota para sostenerlos en proporción al PIB de cada uno.

Corresponde a España aportar, en 2016, el 7,9% del importe del programa obligatorio y, en el conjunto del presupuesto (incluyendo los programas opcionales, un 4,1% (153 millones de los 3.740 millones del presupuesto de la agencia este año, a los que se añaden 1.510 millones de otras instituciones, básicamente la Unión Europea y Eumetsat, sumando un total de 5.250 millones), detalla la ESA.

En la agencia rige el principio de justo retorno, por el que las empresas en conjunto reciben contratos por valor al menos equivalente a la aportación financiera de su país. El Copernicus (GMES) despertó el interés de las compañías desde el inicio y su implicación en la fase de diseño, desarrollo y construcción se ha materializado en los satélites en órbita. La participación española en este programa ronda el 6% de la inversión en la parte de la ESA y el 8% en la de la Comisión Europea.

Un total de 13 empresas españolas participan en Copernicus, según TEDAE (asociación española de empresas tecnológicas de defensa, aeronáutica y espacio). Entre ellas, solo Airbus Defense and Space realiza aportaciones en los seis satélites Sentinel, pero una docena más (Alter Technology, Crisa, Elecnor Deimos, GMV, HV Sistemas, IberEspacio, Indra, Mier Comunicaciones, Rymsa Espacio, Sener, Telespazio Ibérica y Thales Alenia Space España) están implicadas tanto en el diseño y construcción de equipos y sistemas de los artefactos en órbita como en los componentes de segmento de tierra.

En cuanto al más complejo satélite de la serie Sentinel, el 3A lanzado al espacio el pasado 16 de febrero, las contribuciones de las empresas españolas son variadas, tanto en la plataforma espacial como en los instrumentos de observación de la tierra que lleva a bordo, informa Tedae:

Airbus Defense and Space ha participado en el desarrollo y construcción del radiómetro MWR del Sentinel-3A y ha sido responsable de la arquitectura térmica de la plataforma del satélite.

Alter Technology se ha encargado de la ingeniería, ensayos y aprovisionamiento de componentes electrónicos.

Crisa (AirbusDS) ha aportado electrónica para el satélite y para el radiómetro SLSTR y para el MWR.

Elecnor Deimos tiene la responsabilidad de análisis de misión de Copernicus en varias fases del programa y, en concreto, de los Sentinel3 durante su desarrollo. Además aporta software, simulaciones, y el prototipo del procesador óptico del instrumento MWR.

GMV ha desarrollado, entre otras contribuciones, el centro de control instalado en los centro de control en ESOC (de la ESA) y en Eumetsat (ambos en Darmstadt, Alemania), así como el sistema de control orbital, el de planificación de la misión, software del instrumento OLCI y servicio y soporte del segmento terreno.

HV Sistemas se ha encargado de pruebas del instrumento MWR y del SLSTR.

Iberespacio ha aportado equipos del SLSTR e integración de los mismos, así como fabricación de hardware térmico para el OLCI.

Mier Comunicaciones aporta ensayos en banco de pruebas y hardware de comunicaciones y de calibración del instrumento MWR.

Sener se ha encargado del mecanismo selector de un espejo para el radiómetro SLSTR, desarrollando el concepto tanto del mecanismo como de su control y su electrónica.

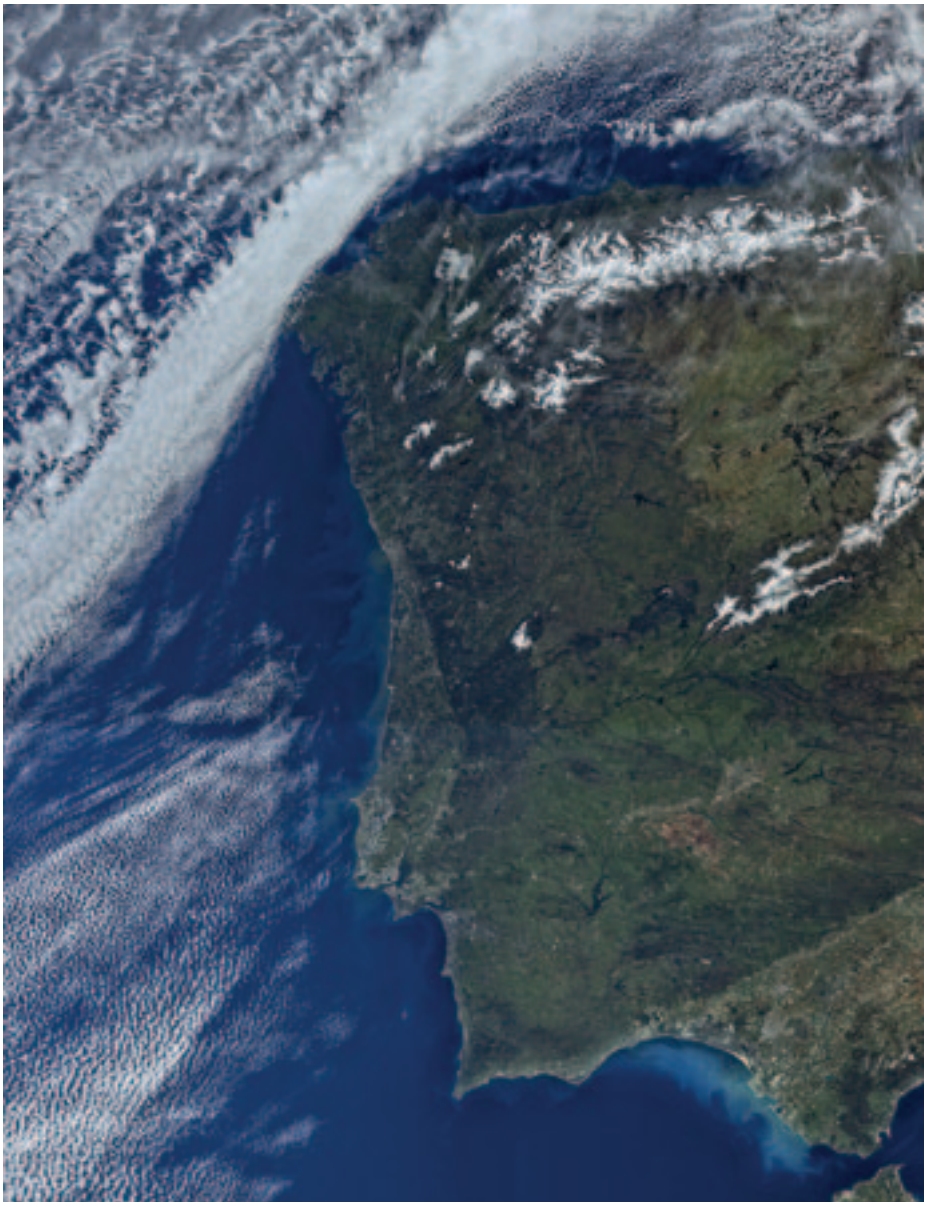
Thales Alenia Space España es responsable de un subsistema de transmisión de datos necesario para el envío a tierra de todos los datos generados por los instrumentos de observación del satélite, así como de los transpondedores de seguimiento, telemetría y telecomando. Además, ha participado en el desarrollo del OLCI y ha aportado unidades electrónicas tanto a este instrumento como del MWR.

meros días de funcionamiento, antes incluso de la fase de calibración y puesta a punto que dura varias semanas antes de comenzar el trabajo regularizado, trazo la altura de la superficie del mar en una zona del Atlántico Norte donde las aguas están entre las más dinámicas del mundo.

El satélite lleva un radiómetro para medir la temperatura superficial del mar y de la Tierra (SLSTR); un instrumento para medir el color de la tierra y los océanos (OLCI); un altímetro radar de apertura sintética (SRAL) y un radiómetro de microondas (MWR). Las aplicaciones de cada uno de ellos por separado o en combinación son múltiples y a medida que se fueron activando uno por uno tras el lanzamiento dejaron más que satisfechos a sus responsables.

"El SRAL se ha diseñado para proporcionar medidas precisas de la altura de la superficie del mar, la altura significante de las olas y la velocidad de los vientos en la superficie del agua de los océanos mundiales para el sistema de predicción oceánica de Copérnico y para monitorizar los cambios en la subida del nivel del mar", explicó Eumetsat, recordando que, como media, el nivel de los océanos del planeta ha subido poco más de tres milímetros al año en las últimas dos décadas, pero con notables variaciones en todo el mundo. Pero el altímetro de este satélite también proporcionará medidas topográficas precisas de los hielos marinos y terrestres, de ríos y de lagos, siendo el primero que es capaz de dar cobertura, con radar de apertura sintética, del 100% de la superficie terrestre.

"Los datos de la altura de la superficie del mar del altímetro del satélite, por ejemplo, mejoraran significativamente nuestra capacidad de analizar y predecir las corrientes oceánicas, lo que es esencial para aplicaciones como seguridad en el mar, rutas marítimas y predicción de la evolución de sucesos contaminantes", explica Pierre-Yves Le Traon, de la empresa Mercator Ocean, empresa francesa de servicios de oceanografía operacional que trabaja en el marco de Copérnico. Es solo un ejemplo de las prestaciones que se espera recibir del Sentinel3-A.



España, Portugal y norte de África en una de las primeras imágenes del Sentinel-3A enviadas pocos días después de su puesta en órbita.

Aunque sea el programa integrado más ambicioso de observación de la tierra que se ha puesto en marcha, los expertos recalcan que los medios espaciales de Copérnico son herederos directos de satélites de la ESA que han sido clave en esta disciplina durante años, en concreto los ERS-1 y 2, y el Envisat. También incorporan la experiencia adquirida, entre otros, con el CryoSat y con los Jason.

Además de las novedades y los avances tecnológicos integrados en la nueva constelación, para mejorar el servicio a los usuarios, especialmente la rapidez en la recepción de datos, la ESA utilizará con los Sentinel su nuevo sistema de comunicaciones ópticas, lo que se ha considerado la autopista espacial de la información, gracias al sistema EDRS (European Data Relay System), cuyo primer terminal láser fue puesto en órbita el pasado enero.

Reacción en cadena

NOTICIAS

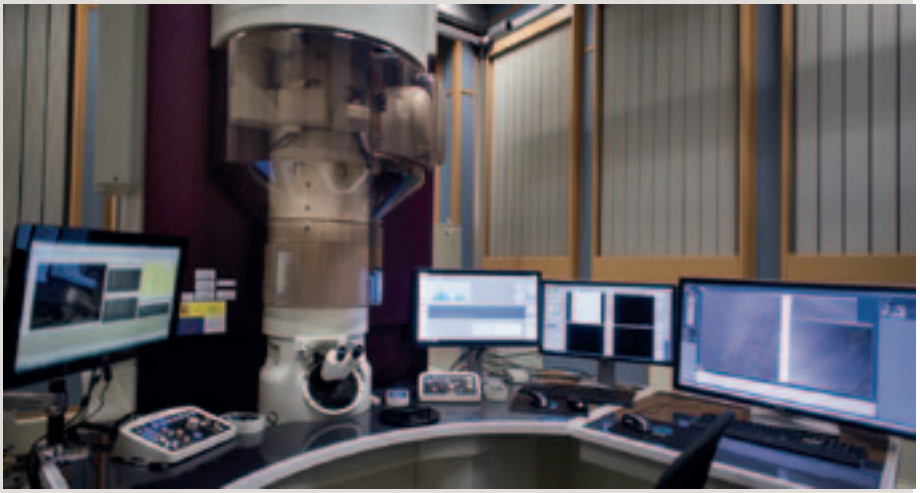
Hyperloop: un AVE supersónico a más de 1.200 km/h

Parece ciencia ficción, pero se trabaja muy en serio en su desarrollo para lograr hacer realidad el primer tren supersónico que se desplazaría en el interior de un tubo a velocidades que superarían los 1.200 kilómetros por hora: cuatro veces la velocidad de un AVE. Se llama *Hyperloop* y acaba de realizar su primera prueba pública en un desierto próximo a Las Vegas (EE. UU). A finales de este año realizará otro ensayo a escala y velocidad real en un tubo de dos kilómetros de longitud.

La compañía Hyperloop One asegura que el primer tren comenzará a circular con carga en 2019 y en 2021 ya dispondrá de la primera unidad para pasajeros para viajar a velocidades superiores a los 1.200 km/h. La ausencia de resistencia del aire en un tubo casi al vacío y de fricción con el suelo es lo que permitirá alcanzar esa velocidad más propia de un avión que de un tren.

La levitación magnética pasiva es una tecnología desarrollada por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermoore de Estados Unidos en los años noventa y cuya licencia ha sido adquirida por Hyperloop Transportation Technologies (HTT) para lograr un sistema más eficiente y seguro que la versión del tren Maglev de levitación magnética que se desarrolla en Japón. La utilización de un sistema de levitación pasiva eliminará la necesidad de construir estaciones eléctricas a lo largo de los recorridos del tren, lo que hace que este sistema sea el más adecuado para la aplicación y mantendrá los costos de construcción en niveles asumibles para el proyecto.

La UCM estrena el microscopio más grande del mundo



Sólo existen tres microscopios Grand ARM300cFEG en todo el mundo. El prototipo se construyó en Tokio (Japón), el segundo se instaló en la República Federal Alemana y desde el pasado 25 de abril la Universidad Complutense de Madrid (UCM) cuenta con el tercero. Instalado en el Centro Nacional de Microscopía Electrónica, permite ver los átomos más ligeros de la tabla periódica, tales como los del hidrógeno, el litio, carbono, nitrógeno y oxígeno

El Grand ARM300cFEG mejora al anterior ARM300 y está equipado también con un corrector de aberración. José González Calbet, director del CNME, considera que este nuevo microscopio traspasa las fronteras de resolución atómica de cualquier otro equipo disponible en el mercado, lo que le convierte en el más potente del mundo en términos de resolución, en torno a 0,05 nanómetros. González Calbet explica que es como si con unas gafas muy potentes pudiéramos ver desde la superficie de la Tierra un garbanzo colocado en la Luna.

El CO2 hace que la Tierra sea hoy más verde que hace tres décadas

Un estudio que acaba de publicar la revista *Nature Climate Change* sostiene que la Tierra ha ganado 36 millones de kilómetros cuadrados de superficie verde, el equivalente a tres veces la extensión de Europa o dos la de Estados Unidos. El estudio, en el que participa el Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF) de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), centra la investigación en los últimos 33 años. Durante ese periodo, la biomasa terrestre ha aumentado en el 40 por ciento de la superficie de la Tierra, mientras que se ha reducido en solo el 4 por ciento. Los científicos relacionan este crecimiento con las altas concentraciones de CO2. Al existir más dióxido de carbono, las plantas han podido generar más hojas capturándolo de la atmósfera durante la fotosíntesis.

Según el estudio, el CO2 es responsable en un 70 por ciento de ese enverdecimiento, pero los investigadores identifican, además, otras razones que explican el incremento de la biomasa: el cambio climático (8%), el nitrógeno atmosférico (9%) y los cambios de uso del suelo (4%).

Sin embargo, los científicos insisten sobre los efectos del exceso de CO2 en la atmósfera, entre los que cabe destacar el cambio climático, que comporta el aumento de la temperatura global, el incremento del nivel del mar, el deshielo o la radicalización climática en los trópicos. En el estudio se concluye que este crecimiento de la biomasa vegetal debido al efecto fertilizante del carbono tiene su techo y que disminuirá a medida que las plantas vayan adaptándose.

LIBROS

Siete breves lecciones de física

Carlo Rovelli

Anagrama / Colección Argumentos

"Hay fronteras, donde estamos aprendiendo y donde arde nuestro deseo de saber. Están en las profundidades más diminutas del tejido del espacio, en los orígenes del cosmos, en la naturaleza del tiempo, en el sino de los agujeros negros, y en el funcionamiento de nuestro propio pensamiento", dice el autor de este libro, que se ha convertido en un inesperado *best seller* en Italia y está siendo traducido a más de veinte idiomas.

Con pasión, fluidez y una encomiable voluntad de explicar de un modo diáfano temas complejos, Rovelli, científico de estirpe humanista, nos propone un recorrido por los hitos de la física de los últimos cien años. Así repasa la teoría de la relatividad de Einstein, la mecánica cuántica, la arquitectura del universo que habitamos, las partículas elementales, la gravedad cuántica, los agujeros negros... Pero también la naturaleza del tiempo y nuestro lugar dentro de este entramado infinito. Siete lecciones magistrales que permiten al lector no especializado adentrarse con facilidad en unos temas *a priori* arduos y áridos.

EXPOSICIONES

La cuna de la humanidad: nuestros primeros pasos

Una extraordinaria recreación del esqueleto de Lucy, la *Australopithecus afarensis* más famosa de la historia, abre 'La cuna de la Humanidad', la exposición abierta en las salas de CosmoCaixa Barcelona hasta enero de 2017. La exposición gira en torno a cuatro ámbitos que representan como hilo conductor los cuatro grandes grupos de homínidos: los australopitecos, los habilitos, los *Homo ergaster/erectus* y los *Homo sapiens* arcaicos. La muestra traza un recorridos que nos traslada casi cuatro millones de años atrás para explicarnos el origen y la evolución de nuestros ancestrosw africanos, su comportamiento y su tecnología, hasta la aparición de los primeros Homo sapiens hace unos 20.000 años. Más de doscientas piezas originales, entre las que se incluyen herramientas líticas y restos faunísticos y paleoantropológicos, se exponen junto a réplicas y moldes de homínidos para explicarnos cómo y cuándo nos hicimos humanos.

'La cuna de la humanidad'. CosmoCaixa Barcelona
www.obrasociallacaixa.org/es/

Panorama

El CSN acoge la 38ª reunión de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares

Los responsables de los organismos reguladores de Alemania, Canadá, Corea del Sur, Estados Unidos, Francia, Japón, Reino Unido Suecia y España han mantenido dos jornadas de trabajo en la sede del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) de Madrid, en el marco de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (por sus siglas en inglés INRA) para abordar y compartir experiencias y mejoras en la seguridad nuclear, desde la perspectiva reguladora para aplicar en sus respectivos países y a escala mundial.

El presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Fernando Marti Scharfhausen, inauguró estas jornadas en las que los representantes de los organismos reguladores de los nueve países participantes intercambiaron información sobre las novedades acontecidas en el último año. Durante la ronda de presentaciones de los asuntos destacados por cada delegación, destinada a actualizar la información desde la última reunión, Marti Scharfhausen compartió con sus homólogos los principales trabajos de estos últimos meses del organismo regulador español.

El presidente del CSN comentó el estado en curso del proceso de licenciamiento del Almacén Temporal centralizado (ATC) de Villar de Cañas (Cuenca) y de la renovación de la autorización de la central nuclear de Santa María de Garoña (Burgos), así como el grado de avance de los planes de acción tras el accidente de Fukushima (Japón). También hizo referencia a las actividades internacionales más relevantes del CSN, muchas de ellas en el marco de la Unión Europea dentro de los grupos WENRA o ENSREG.

Durante la segunda jornada se analizaron también las misiones internacionales IRRS (por sus siglas en inglés, Integrated Regulatory Review Service) y, en concreto, las delegaciones japonesas y francesas presentaron los resultados de la misión IRRS a Japón en 2016. Asimismo se han comentado las novedades a introducir en la Convención de Seguridad Nuclear.

Finalmente se analizó el grado de interacción y relaciones entre esta asociación y otras europeas como la Asociación Europea de Autoridades Competentes en Protección Radiológica (por sus siglas en inglés, HERCA) y la Asociación de Reguladores Nucleares de Europa Occidental (por sus siglas en inglés, WENRA), así como los diferentes programas de gestión del conocimiento que los reguladores nucleares presentes llevan a cabo en sus respectivas organizaciones.

INRA, constituida por los organismos reguladores de los nueve países del mundo con más experiencia en el licenciamiento de actividades nucleares (Alemania, Canadá, Corea del Sur, España, Estados Unidos, Francia, Japón, Reino Unido y Suecia), se creó en París en mayo de 1997. Es un foro de alto nivel en materia de Seguridad Nuclear, cuyos principales objetivos son el fomento de la transparencia, la cooperación multilateral y el intercambio de experiencias entre los diferentes países que componen esta asociación internacional.

14º Conferencia de la Asociación Internacional de Protección Radiológica

Una delegación del CSN, encabezada por la vicepresidenta Rosario Velasco y la subdirectora de Protección Radiológica Ambiental, Lucila Ramos, ha participado en la 14ª Conferencia de la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA), en Ciudad del Cabo (Sudáfrica) entre el 9 y el13 del pasado mes de mayo. La conferencia ha contado con 900 expertos de 72 países, y su objetivo ha sido el de proporcionar un medio de comunicación efectivo para avanzar en la protección radiológica en el mundo, y facilitar la aplicación y utilización segura de las radiaciones ionizantes en los campos de la medicina, industria y científico.Durante las jornadas, la vicepresidenta del consejo ha presidido una sesión dedicada al desarrollo global de los niveles de referencia de dosis en diagnóstico y a la estimación de exposiciones médicas.

La conferencia fue inaugurada por la presidenta de IRPA, Renate Czarwinski, que estuvo acompañada por el director general del OIEA, Yukiya Amano. Durante las jornadas, la vicepresidenta del consejo ha presidido una sesión dedicada al desarrollo global de los niveles de referencia de dosis en diagnóstico y a la estimación de exposiciones médicas.

En la asamblea celebrada con motivo de su decimocuarto congreso internacional se ha elegido como vicepresidente de IRPA para los dos próximos años al español Eduard Gallego, catedrático de la UPM.

10ª reunión del Comité Asesor para la información y participación pública

El Comité asesor para la información y participación pública del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) celebró su décima reunión el pasado 21 de enero. El presidente del Comité y del CSN, Fernando Marti Scharfhausen, dio la bienvenida a los integrantes, en el que también ha estado presente la vicepresidenta del organismo regulador, Rosario Velasco.

A lo largo de la reunión se analizaron temas de actualidad en el sector que han sido respondidas, además de por el presidente del Consejo, Fernando Marti Scharfhausen, por la secretaria general del organismo, María Luisa Rodríguez, así como por la directora técnica de Protección Radiológica, María Fernanda Sánchez, y los subdirectores de Instalaciones Nucleares, Ingeniería, y Tecnología Nuclear Manuel Rodríguez, José Ramón Alonso y Rafael Cid, respectivamente. Además, se trató el protocolo de Colaboración Unesa-UME sobre preparación de la UME para intervención en situaciones de emergencia de gravedad extrema en centrales nucleares españolas y la implantación de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Radiológico. Ambos temas fueron presentados por la directora técnica de Protección Radiológica. Por su parte, el subdirector de Instalaciones Nucleares expuso los resultados, las prácticas recomendables y los retos detectados durante el segundo workshop sobre los planes de acción nacional tras el accidente de Fukushima.

Comisiones Mixtas de Seguimiento

El Consejo de Seguridad Nuclear ha acogido, entre el 9 de febrero y 26 de mayo, las reuniones anuales de la Comisión Mixta de Seguimiento del Acuerdo de Encomienda firmado con las comunidades autónomas de las Islas Baleares, Valencia, Asturias, País Vasco y la Comunidad Foral de Navarra.

Baleares. El acuerdo firmado con la Comunidad de Baleares se refiere al licenciamiento, control e inspección de las instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría (incluidos los rayos X médicos) de los servicios de protección Radiológica y de los transportes de material radiactivo. En representación de la comunidad autónoma han participado el director general de Industria y Energía, Bartomeu Morro, y el jefe de la sección de Seguridad Nuclear, Joan Antoni Llauger, quienes han sido recibidos por la secretaria general del CSN, María Luisa Rodríguez, y la directora técnica de Protección Radiológica, María Fernanda Sánchez, entre otros directivos.

Comunidad Valenciana. En la reunión con la Generalitat Valenciana se han abordado las funciones de inspección y control de instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría, en los ámbitos de la investigación, el diagnóstico y/o los tratamientos médicos y los usos industriales de fuentes y equipos radiactivos, así como en las instalaciones que utilizan aparatos de rayos X, junto con la inspección de transportes de material radiactivo. Por parte del CSN asistieron, entre otros, la secretaria general, María Luisa Rodríguez y los subdirectores de Protección Radiológica Operacional y Ambiental. Por parte de la Generalitat Valenciana, estuvieron presentes el subdirector general de Emergencias, Jorge Suárez, y el jefe de sección de Seguridad Radiológica e inspector acreditado, José Peiró Juan.

Principado de Asturias. Con el Principado de Asturias el acuerdo se refiere a las funciones de inspección y control de instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría en los ámbitos de la investigación, el diagnóstico y/o los tratamientos médicos y los usos industriales de fuentes y equipos radiactivos, así como en las instalaciones que utilizan aparatos de rayos X, junto con la inspección de transportes de material radiactivo. La delegación asturiana, encabezada por el director general de Industria, Luis Ángel Colunga, ha sido recibida por la secretaria general del CSN, María Luisa Rodríguez, quien ha estado acompañada por la directora técnica de Protección Radiológica.

16ª reunión del Comité de Información de Almaraz

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha participado en la 16ª reunión del Comité de Información de Almaraz (Cáceres). Presidida por el subdirector general de Energía Nuclear del Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Minetur), José Manuel Redondo, contó con la participación de Sabina Hernández, alcaldesa de Almaraz, y con la representación de los ayuntamientos de Casatejada, Casas de Miravete, Higuera de Albalat, Toril y Saucedilla, así como representantes de la Delegación del Gobierno en Extremadura, de la Dirección General de Protección Civil y Emergencias y miembros de asociaciones municipales.

En el encuentro, el director de la central nuclear de Almaraz, José María Bernaldo de Quirós, realizó un resumen de los acontecimientos más significativos desde la celebración de la reunión anterior. Por parte del CSN, Alejandro de Santos Callejo expuso la valoración de los resultados de la central nuclear de Almaraz en el Sistema Integrado de Supervisión de Centrales Nucleares (SISC) durante este último año, publicados en la *web* del Consejo http://www.csn.es/sisc/index.do.

Por su parte, el subdirector de Instalaciones Nucleares del organismo regulador, Manuel Rodríguez Martí, presentó el examen de los organismos reguladores nacionales que realiza el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), mientras que el jefe de Relaciones Institucionales del CSN, Pedro Vila-Belda, concluyó la reunión con una presentación de la nueva *web* del organismo regulador.

El director técnico de Seguridad Nuclear del CSN, en la misión IRRS de Japón

El director técnico de Seguridad Nuclear del (CSN), Antonio Munuera, ha participado en la misión internacional IRRS (por sus siglas en inglés, *Integrated Regulatory Review Service*) que el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha celebrado en Japón. El equipo ha estado formado por 19 expertos de 17 países y cinco funcionarios del OIEA. Al frente ha estado Philippe Jamet, consejero de la Autoridad de Seguridad

Comisiones de Seguimiento de la cátedras del CSN

La vicepresidenta del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Rosario Velasco, y el director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (ETSIME) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), José Luis Parra, han presidido la primera reunión correspondiente a 2016 de la Comisión de Seguimiento de la Cátedra Juan Manuel Kindelán de formación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica en la sede del organismo regulador.

Durante la reunión, se han expuesto las actividades y proyectos realizados en 2016. También se han discutido propuestas de nuevas actividades de la cátedra. Como actividad destacada en 2016, se ha presentado y discutido algunos detalles sobre el curso de Combustible nuclear, que se celebrará entre el 27 de junio y 1 de julio próximos y que se considera de alto interés, tanto desde el punto de vista del regulador como de todas las entidades relacionadas con el ciclo de combustible nuclear en el sector.

Cátedra Vicente Serradell, de Valencia

El pasado 12 de mayo se celebró, presidido por el consejero de CSN Fernando Castelló, la reunión del Comité de Seguimiento de la cátedra Vicente Serradell, en Valencia. Se expusieron las actividades y proyectos a realizar en 2016, entre los que destacan la concesión de becas de doctorado y las ayudas predoctorales, así como la realización de cursos de formación y seminarios relacionados con el sector nuclear, y la invitación de expertos para impartir complementos de formación.

El consejero Castelló ha manifestado su deseo de que este nuevo marco de colaboración se traduzca en facilitar nuevas oportunidades, tanto para los estudiantes de la UPV como para el empleo en la industria valenciana.

Cátedra Argos, de Barcelona

Javier Dies, consejero del CSN, y la directora de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSEIB) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), Neus Cónsul, han presidido la reunión del Comité de Seguimiento de la cátedra Argos en Seguridad Nuclear de Barcelona.

Se han expuesto las actividades y proyectos a realizar en 2016 y 2017: concesión de becas de doctorado, habilitación de bolsas de viaje para asistencia a congresos, ayuda a trabajos final de master, becas de matrícula al *Master of Nuclear Engineering* y premio al mejor expediente en el *Master of Nuclear Engineering* (MNE) o en el *European Master in Nuclear Energy* (EMINE) impartidos ambos por la ETSEIB-UPC.

Cátedra Federico Goded, de la UPM

La consejera del CSN Cristina Narbona y el director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Emilio Mínguez, presidieron el 16 de marzo la segunda reunión del Comité de Seguimiento de la cátedra de seguridad nuclear Federico Goded.

Se expusieron los oproyectos a realizar en 2016, entre los que destacan: becas de doctorado, ayudas predoctorales, habilitación de bolsas de viaje para la asistencia a congresos y lorganización de cursos con expertos internacionales. También se prevén varios cursos de formación y seminarios en materias relacionadas con el sector nuclear, la invitación de expertos para impartir complementos de formación y la asistencia gratuita de alumnos y profesores a estas actividades de formación.

Nuclear (ASN) de Francia.

El español Juan Carlos Lentijo, director general adjunto de Seguridad Nuclear del OIEA, participó en la reunión de cierre de esta misión, así como en la rueda de prensa posterior.

En este encuentro, el equipo de expertos del OIEA visitó, además de las centrales de Fukushima Daiichi y Takahama, el centro de reprocesado de combustible Rokkasho, así como el reactor de investigación Tokai y la instalación de radiación ubicada en este mismo lugar.

La misión ha revisado el funcionamiento del organismo regulador japonés, la Autoridad de Regulación Nuclear (ARN), creado en septiembre de 2012 a raíz del accidente de Fukushima.

Principales acuerdos del Pleno

Revisión de las ETFM, modificación de sistemas eléctricos y mejoras de aislamiento en Santa María de Garoña

En su reunión de 23 de febrero, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) aprobó, por cuatro votos a favor y uno en contra, la solicitud de revisión de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas (ETFM) de la CN Santa María de Garoña. El objeto de la solicitud de revisión de las ETFM es adaptar el contenido de las mismas a la modificación de diseño MD-574, cuyo objeto es instalar nuevos relés de mínima tensión de las barras de emergencia de media tensión para aumentar el margen sísmico y mejorar con ello su fiabilidad ante terremotos. Estos cambios afectan a las ETFM que serían de aplicación una vez otorgada la renovación de la autorización de explotación. El Pleno ha estudiado la solicitud del titular y la propuesta de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear y acuerda, con el voto en contra de la consejera Sra. Narbona, aprobarla en los términos propuestos.

La Secretaría General presentó a la consideración del Pleno la propuesta de apreciación favorable parcial, con condición, de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear a la solicitud de apreciación favorable de la modificación de diseño (MD) sobre la independencia de sistemas eléctricos de la CN de Garoña. Se estudió la solicitud del titular y la propuesta de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear y se aprobó por cuatro votos a favor y el voto en contra de la consejera Sra. Narbona.

El Pleno aprobó a continuación la solicitud de las modificaciones de diseño correspondientes al aislamiento de la contención primaria de la Santa María de Garoña. Igualmente por cuatro votos a favor y el voto en contra de la consejera Sra. Narbona, fue aprobada la modificación de diseño sobre protección de equipos relacionados con la seguridad frente a la caída de la cubierta del edificio de turbina tras un incendio. La modificación de diseño tiene por objeto proteger los equipos relacionados con la seguridad y de parada segura que podrían resultar afectados por una hipotética caída de la cubierta del edificio de turbina debido a un incendio. Por unanimidad, el Pleno aprobó la solicitud de modificación del condicionado de la Resolución de 12 de mayo de 2005, por la que se autoriza la ampliación de las condiciones de utilización del edificio de almacenamiento de material usado (EAMU) de Santa María de Garoña.

Instrucción técnica sobre la ampliación del ATC de Enresa

La Secretaría General presento el 17 de febrero a la consideración del Pleno la propuesta de aprobación de Instrucción Técnica de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear a remitir a Enresa sobre la aplicación al Almacén Temporal Centralizado (ATC) de la Directiva 2014/87/EURATOM del Consejo, de 8 de julio de 2014, por la que se modifica la Directiva 2009/71/Euratom, y se establece un marco comunitario para la seguridad nuclear de las instalaciones nucleares. El Pleno acordó la aprobación de la propuesta por cuatro votos a favor y el voto en contra de la consejera Sra. Narbona.

Revisión de la Guía de Seguridad de los manuales de protección radiológica

Se presentó a la consideración del Pleno el 15 de abril el borrador 2 de la Guía de Seguridad del CSN GS-07.06, Rev. 1, Contenido de los manuales de protección radiológica de instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo de combustible nuclear, remitido por la Subdirección de Asesoría Jurídica, una vez que han sido valorados los comentarios externos. El Pleno acordó, por unanimidad, aprobar la Guía de Seguridad del CSN.

Instrucción sobre aparatos que sean generadores de radiaciones ionizantes

El pasado 26 de abril, por unanimidad, el Pleno acordó aprobar la Instrucción del Consejo sobre la documentación que debe aportarse en apoyo a la solicitud de autorización para la comercialización o asistencia técnica de aparatos, equipos y accesorios que incorporen material radiactivo o sean generadores de radiaciones ionizantes (NOR/13-007). La Instrucción obedece a la necesidad de desarrollar el contenido de los documentos que se deben presentar, incorporando los criterios que el CSN considera que deben cumplirse para poder elaborar el preceptivo informe favorable.

Proyecto de instrucción sobre requisitos de vigilancia y mantenimiento en centrales nucleares

El Pleno del CSN aprobó por unanimidad, en su reunión del 5 de mayo, el Proyecto de Instrucción del Consejo IS-15, revisión 1, sobre requisitos para la vigilancia de la eficacia del mantenimiento en centrales nucleares (NOR/14- 003). Borrador 2. La Instrucción tiene por objeto establecer los criterios generales que deben cumplirse en la vigilancia de la eficacia de las prácticas de mantenimiento de las centrales nucleares. Los requisitos establecidos en la misma son aplicables a todas las condiciones de operación de una central nuclear, así como a centrales nucleares en periodo de cese de explotación hasta el inicio de la fase de desmantelamiento.

www.csn.es

El Consejo de Seguridad Nuclear pone en marcha aplicaciones para móviles y tabletas iOS y Android

El Consejo de Seguridad Nuclear ha puesto en marcha diversas aplicaciones gratuitas a disposición del público para teléfonos móviles y tabletas que emplean los sistemas operativos habituales iOS y Android.

Se trata de cuatro aplicaciones sobre las siguientes materias:

Noticias CSN: que despliega aquellas noticias en las que el CSN tiene algún protagonismo, los estados operativos de las centrales nucleares españolas y los valores de tasa de dosis media diaria y mensual prevenientes de las estaciones automáticas repartidas por España.

Siglas CSN: presenta un diccionario del significado de las siglas y términos utilizados normalmente en la industria nuclear y radiológica, en inglés y en español.

Visita virtual al Centro de Información: realiza un recorrido guiado a través de 29 módulos para conocer con detalle diversos aspectos relacionados con la seguridad nuclear y las radiaciones ionizantes

Módulos interactivos: presenta ejercicios de preguntas y respuestas en varios de los módulos de Centro de Información del CSN.

Todas ellas están disponibles para versiones iOS 7 (o superior) y Android 4 (o superior) en la App Store (Apple) y en Play Store (Android), respectivamente.

También se pueden instalar visitando el siguiente enlace: https://www.csn.es/app-aplicaciones-moviles

Noticias CSN

Muestra las noticias del CSN, sucesos notificados, estados operativos de las centrales nucleares española y datos ambientales de la Red de Estaciones Automáticas (12MB).

Siglas nucleares y radiológicas

Desarrolla el diccionario de siglas y términos nucleares y radiológicos, tanto en inglés como en español. Busca en la sigla y la descripción. No necesita conexión a Internet (2.9MB).

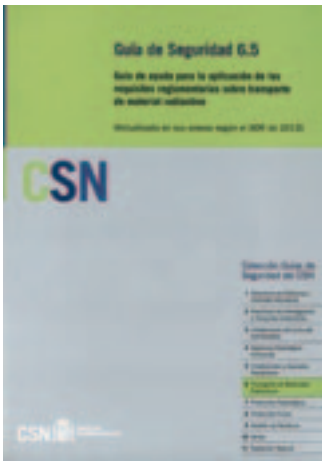
Visita virtual al centro de información

Muestra el centro de informacion del CSN mediante un recorrido guiado a traves de 29 módulos para conocer con detalle diversos aspectos relacionados con las radiaciones ionizantes (84MB).

Módulos interactivos

Conoce más sobre Radiación Natural, Radiación Artificial, los Seres Vivos y conoce la Sala de Emergencias del Consejo de Seguridad Nuclear (SALEM) (114MB).

Publicaciones



Guía de Seguridad 6.5
Guía de ayuda para la aplicación de los requisitos reglamentarios sobre transporte de material radiactivo

Instrucción IS-37, sobre análisis de accidentes base de diseño en centrales nucleares

Instrucción IS-38, sobre la formación de las personas que intervienen en los transportes de material radiactivo por carretera

Instrucción IS-39, en relacióncon el control y seguimiento de la fabricación de embalajes para el transporte de material radiactivo

Jornada 10º aniversario de las cátedras del CSN
Principales actividades realizadas en el periodo 2005-2014

Jornada 10º aniversario de las cátedras del CSN
Anexo: Actividades realizadas en el año 2015

aLFa Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

Boletín de suscripción

Institución/Empresa

Nombre

Dirección

CP Localidad Provincia

Tel. Fax Correo electrónico

Fecha Firma

Enviar a **Consejo de Seguridad Nuclear — Servicio de Publicaciones.** Pedro Justo Dorado Delmans, 11. 28040 Madrid / Fax: 91 346 05 58 / peticiones@csn.es

La información facilitada por usted formará parte de un fichero informático con el objeto de constituir automáticamente el Fichero de destinatarios de publicaciones institucionales del Consejo de Seguridad Nuclear. Usted tiene derecho a acceder a sus datos personales, así como a su rectificación, corrección y/o cancelación. La cesión de datos, en su caso, se ajustará a los supuestos previstos en las disposiciones legales y reglamentarias en vigor.

Abstracts

REPORTS

6 Gravitational waves: Einstein's latest victory

The world of theoretical physics is once again celebrating success: the LIGO observatory in the United States has confirmed the direct detection of general relativity: gravitational waves. The almost imperceptible distortions of space-time had been generated by the fusion of black holes of 30 times the mass of the Sun located at a distance of some 1,300 million light years from us.

20 Pulsed Laser Centre (CLPU). The Salamanca petawatt laser

With pulses lasting 30 photoseconds, the CLPU VEGA laser is capable of generating a peak power level of one petawatt, this making it one of the world's most powerful lasers. When focussed it can reach extreme intensities. The way in which a pulse of this nature interacts with an atom or what its applications might be are among the questions answered by this article.

38 Leading names in science. Marie Curie: faith in the invisible

She has been called the mother of relativity. She combined her passion for science with her love for her husband and daughters and went where no other researcher had previously gone in her search for those unknown elements that held the key to radiation. But there are aspects of the life of Marie Curie that transcend the world of science.

56 The Sentinel satellites revolutionise environmental observation

Europe has in orbit three Sentinel satellites that are the backbone of the ambitious Copernicus system. Aimed at revolutionising environmental observation from both the scientific and commercial points of view, their objective is to capture massive volumes of data on the Earth with a view to ensuring progress in research into climate change, the oceans and the evolution of ice formations.

INTERVIEW

14 Javier Dies Llovera, CSN counsellor

"The right path is to move towards regulatory efficiency".

INSIDE THE CSN

28 The Sub-directorate of Operational Radiological Protection is an area of the CSN that oversees the safety of the workers

The safety of radioactive facilities is an essential part of the radiological protection of the more than 100,000 workers who are professionally exposed to ionising radiations. The Sub-directorate of Operational Radiological Protection is in charge of this task and of authorising the more than 1,340 radioactive facilities that are distributed across the country and ensuring their safety.

TECHNICAL ARTICLES

31 The CSN hosts the Second International Conference on Nuclear Security in Madrid

The second International Conference on Nuclear Security was held in Madrid between May 9th and 13th last. The acting Minister of the Interior announced that the number of officers of the Guardia Civil watching over the Spanish nuclear power plants will be doubled.

35 International Conference on Promotion of the Global Application of Decommissioning and Environmental Restoration Programmes

The Conference on Promotion of the Global Application of Decommissioning and Environmental Restoration Programmes, organised by the International Atomic Energy Agency (IAEA) with CSN participation, was held in Madrid between May 23rd and 27th.

44 Safety Culture in organisations, facilities and activities entailing ionising radiation sources

The Latin American Forum of Radiological and Nuclear Regulatory Authorities is an association created in 1997 with the aim of promoting the highest levels of nuclear and radiological safety and security among its member countries.

RADIOGRAPHY

53 Cyclotron-based manufacturing of PET radiopharmaceutical products in Spain

Cyclotron-based manufacturing of PET radiopharmaceutical products in Spain

El Consejo de Seguridad Nuclear estrena web con mejores contenidos, mejor usabilidad y un diseño *responsive* que se adapta a todas las pantallas y a los nuevos terminales inteligentes.

Toda la información sobre seguridad nuclear y protección radiológica, de la mano del organismo regulador, ahora más fácil de navegar y con una estructura más clara.

www.csn.es

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR