

FÍSICA EXPERIMENTAL INTERDISCIPLINARIA

Esbaide Adem Chahin ◉ Luis Novoa ◉ Octavio Miramontes
Editores

Esbaide Adem Chahin
Coordinadora

Autores

Esbaide Adem Chahin • Héctor Alva Sánchez • Miguel Avalos Borja •
Rafael A. Barrio • Xim Bokhimi • María Ester Brandan • Efraín R. Chávez
Lomelí • Lenin F. Escamilla-Herrera • Gerardo García Naumis • Arturo
Menchaca • Karo Michaelian • Javier Miranda • Matías Moreno Yntriago •
Jorge Rickards • Alberto Robledo • Mercedes Rodríguez • Oscar
Rodríguez • José Luis Ruvalcaba

CopIt-arXives
Publishing Open Access
with an Open Mind
2019

Este libro contiene material protegido por las leyes de autor

Todos los derechos reservados © 2019

Publicado digitalmente en México, por CopIt-arXives

Editado por Esbaide Adem Chahin, Luis Novoa y Octavio Miramontes

Coordinado por Esbaide Adem Chahin

Diseño de portada: Luis Novoa

Física Experimental Interdisciplinaria

[Editores] E Adem Chahin, L Novoa y O Miramontes . — México CDMX: CopIt-arXives, 2019

Incluye bibliografía e índice

ISBN: 978-1-938128-20-2 ebook

Derechos y permisos

Todo el contenido de este libro es propiedad intelectual de sus autores quienes, sin embargo, otorgan permiso al lector para copiar, distribuir e imprimir sus textos libremente, siempre y cuando se cumpla con lo siguiente: (i) el material no debe ser modificado ni alterado, (ii) la fuente debe ser citada siempre y los derechos intelectuales deben ser atribuidos a sus respectivos autores, (iii) estrictamente prohibido su uso con fines comerciales.

El contenido y puntos de vista planteados en cada capítulo es responsabilidad exclusiva de los autores y no corresponden necesariamente a los de los editores o a los de ninguna institución, incluidas CopIt-arXives o la UNAM.

Producido con software libre incluyendo \LaTeX . Indexado en el catálogo de publicaciones electrónicas de la UNAM y en Google Books.

Todas las figuras e imágenes son cortesía de www.wikimedia.org o bien de los autores, a menos que se señale lo contrario explícitamente.

Los editores agradecen el apoyo de DGAPA-UNAM a través de los proyecto PAPIIT IN-105015, IN-103516 y IN-IN107619

ISBN: 978-1-938128-20-2 ebook

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>

Este libro ha pasado por revisión de pares

CopIt-arXives

Cd. de México - Cuernavaca - Madrid - Curitiba

Viçosa - Washington DC - London - Oxford

Con el apoyo de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Instituto de Física

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	
<i>Cecilia Noguez</i>	1
PRÓLOGO	
<i>Esbaide Adem Chahin</i>	3
LA FÍSICA EN LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS	
<i>Esbaide Adem Chahin</i>	5
La irradiación de alimentos con un haz de electrones	8
Un pequeño repaso sobre las radiaciones ionizantes	10
Caracterización del haz de electrones	12
Dosimetría cualitativa	12
Dosimetría cuantitativa	13
La razón de dosis	13
Dosis empleadas en la irradiación de los alimentos	14
Aplicaciones de la radiación	14
El acelerador Van de Graaff de electrones	15
Funcionamiento	15
Planta piloto para la irradiación de maíz a granel	16
Agradecimientos	18
Bibliografía	19
EL MICRO Y EL NANO-MUNDO, VISTOS A TRAVÉS DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO	
<i>Miguel Avalos Borja</i>	21
Agradecimientos	33
Bibliografía	33

LA FÍSICA EXPERIMENTAL EN BIOLOGÍA

<i>Rafael A. Barrio Paredes</i>	35
Introducción	35
Física del estado sólido	37
Semiconductores y computación	40
Sensores de Silicio en Electrofisiología	42
Computación	43
El Campo Electromagnético	44
Fijación de membranas	47
Fluorescencia	48
Microscopía de dos fotones	50
Microscopía confocal	51
Física No-lineal	52
Modelo BVAM	54
El corazón	56
Conclusiones	57
Bibliografía	58

DESARROLLO DE NUEVAS FUENTES DE RAYOS X EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XXI

<i>Xim Bokhimi</i>	61
Los electrones y sus cambios de energía	61
Origen de las líneas discretas en el espectro de rayos x	64
Origen del espectro continuo de rayos x	66
Radiación de rayos X generada en un sincrotrón	67
Radiación de rayos x generada en un ondulator	69
Radiación de rayos x generada mediante fricción	74
Arreglos de fuentes de rayos x	74
Conclusiones	76

EL DESAFÍO DE VER EL INTERIOR DEL CUERPO: LAS IMÁGENES MAMOGRAFICAS

<i>María Ester Brandan</i>	77
Imágenes médicas	77
Las radiografías	78
La "calidad" de una imagen	80
Las mamografías	81
La técnica mamográfica actual	84

Las técnicas del futuro (ya muy cercano...)	88
A modo de conclusión	90
Agradecimiento	91
Bibliografía	91
EL NÚCLEO ATÓMICO EN EL SIGLO XXI	
<i>Efraín R. Chávez Lomelí</i>	93
Masa y tamaño	96
Reacción nuclear de fusión	100
LECCIONES DE LOS EXPERIMENTOS DEL SIGLO XXI	
<i>Gerardo Gracia Naumis</i>	105
OBSERVANDO ANTIMATERIA CÓSMICA EN LA ESTACION ESPACIAL INTERNACIONAL	
<i>Arturo Menchaca</i>	113
Introducción	113
La materia	114
La antimateria	115
El modelo estándar	116
¿Cómo se obtiene la antimateria?	119
Aplicaciones prácticas	120
Antimateria cósmica	121
LA ESTRUCTURACIÓN DISIPATIVA FOTOQUÍMICA DE LA VIDA	
<i>Karo Micaelian, Lenin F. Escamilla-Herrera, Oscar Rodríguez</i>	127
Introducción	127
Termodinámica y mecánica estadística; equilibrio termodinámico	129
Termodinámica fuera de equilibrio y fenómenos irreversibles	131
Origen y evolución de la vida en la tierra: un problema multidisciplinar	132
Planteamiento del problema	133
Áreas de Trabajo	137
Explicación termodinámica de la ubicuidad cósmica de pigmentos orgánicos	137
Estructuración disipativa microscópica y proliferación en el origen de la vida	137

La desnaturalización del ADN inducida por fotones: una posible vía disipativa para la replicación no enzimática en el Arqueano	138
Origen de la codificación de información en ácidos nucleicos a través de un relación disipación-replicación	138
Estructuración fotoquímica disipativa de las vesículas de ácidos grasos del Arqueano	139
La homquiralidad a través de la desnaturalización inducida por fotones de ARN / ADN en el origen de la vida	139
Catálisis biológica del ciclo hidrológico	140
Estabilidad termodinámica de ecosistemas	140
Conclusiones	141
Agradecimientos	141
Bibliografía	141
ANÁLISIS ELEMENTAL DE AEROSOLAS ATMOSFÉRICOS: LO QUE PODEMOS APRENDER DE ELLOS	
<i>Javier Miranda y Valter A. Barrera</i>	145
Introducción	145
Métodos para análisis de aerosoles	148
El tratamiento de los datos obtenidos	150
Conclusiones	159
Bibliografía	159
FUENTES DE LUZ SINCROTRÓN PARA MÉXICO: FÍSICA, CIENCIA, ECONOMÍA Y POLÍTICA	
<i>Matías Moreno</i>	161
Una propuesta	162
Principios básicos de la luz de sincrotrón	163
Propiedades de la luz sincrotrón	165
¿Quién tiene acceso?	166
Tipos de sincrotrón	167
Usuarios Mexicanos	170
Acciones para impulsar el Sincrotrón Mexicano	171
Conclusiones y Retos	171
Acotaciones	172
Agradecimientos	173
Apéndice	176

LAS RADIACIONES EN EL SIGLO XXI <i>Jorge Rickards</i>	177
SOBRE LAS OBSERVACIONES EXPERIMENTALES EN LA FÍSICA DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS <i>Alberto Robledo</i>	189
Introducción	190
Ejemplos de sistemas complejos	191
Carácter de la investigación sobre sistemas complejos	193
Sistemas de agentes	193
Teoría de la información	194
Teoría de juegos	194
Teoría de redes	195
Escalamiento	195
Dinámica no lineal	196
Observaciones y datos experimentales sobre sistemas complejos	196
Conclusiones	201
Agradecimiento	202
Bibliografía	202
TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES: UNA APLICACIÓN EXITOSA DE LA INSTRUMENTACIÓN Y LA ANTIMATERIA <i>Mercedes Rodríguez y Héctor Alva Sánchez</i>	205
La antimateria	206
Tomografía por Emisión de Positrones (PET)	208
Principios físicos de la detección en coincidencia	210
Detectores para PET	213
Ejemplo de estudios PET con diferentes radiofármacos	217
Equipos de mamografía por emisión de positrones	219
Equipos multimodales	219
Tomografía por emisión de positrones para animales pequeños	220
Instrumentación para microPET en la UNAM	224
Una última reflexión	228
Agradecimientos	228
Bibliografía	228

ESPECTROSCOPIAS PARA EL ARTE Y LA ARQUEOLOGÍA: LOS FOTONES	
NOS CUENTAN LA HISTORIA	
<i>José Luis Ruvalcaba S.</i>	231
Análisis de materiales, ¿para qué?	231
Fotones y Espectroscopías	232
De Objetos a Objetos	234
Nuevas Metodologías y Nuevas Técnicas	237
Estudios Interdisciplinarios	238
Estudios de Colecciones y Objetos Relevantes	239
Observaciones Finales	242
Agradecimientos	244
Bibliografía	244
LOS AUTORES	247

PRESENTACIÓN

LA física, es la disciplina que con su carácter intrínsecamente experimental explora la naturaleza a todas las escalas, tiempos y espacios: el universo entero. El quehacer en la física trastoca y complementa ampliamente conceptos, leyes y modelos, dando sentido a la palabra interdisciplina. *Física Experimental Interdisciplinaria* nos ofrece esta visión tan completa y profunda del trabajo actual de la ciencia en México y su impacto en la solución de los enigmas científicos, los que resultan cada vez más complejos y retadores. Este libro muestra diferentes aspectos de la física experimental y de sus aplicaciones, que van desde la conservación de alimentos por medio de la radiación con electrones, la física experimental biológica, hasta la observación de la antimateria en la Estación Espacial Internacional. Aquí, se reúne 15 temas diferentes de actualidad por especialistas, casi todos del Instituto de Física de la UNAM, en donde los estudiantes y los curiosos encontrarán una gran diversidad de contenidos, técnicas, preguntas y varias respuestas, que nos permiten dar constancia de la importancia de la física en la actualidad.

La física experimental interdisciplinaria requiere de preguntas profundas, una gran imaginación y la creación de nuestra propia instrumentación. Lo que permite no sólo entender lo que ocurre en nuestro alrededor, sino también más allá de nuestro planeta. Este compendio de temas es un esfuerzo para mostrar cómo los físicos vivimos fascinados con nuestro trabajo de entender el entorno y cómo se usa ese conocimiento en beneficio de todos y de todo, incluyendo el medio ambiente, las grandes ciudades, los seres vivos, las aguas, los volcanes y un sin fin de temas. En este libro, Esbaide Adem Chahin logró congrega a muchos expertos que nos abren nuevos horizontes, nos muestran nuevas incógnitas y reta nuestra curiosidad; aquella que ha motivado, motiva y motivará a los científicos.

Cecilia Noguez
Ciudad Universitaria, CDMX, 2019

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

PRÓLOGO

FUE para mí un alto honor coordinar este libro, los autores participantes en esta obra somos quince investigadores titulares de los más altos niveles, miembros del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, y del Sistema Nacional de Investigadores. Todos con un gran número de publicaciones científicas en revistas internacionales, conferencias, seminarios y publicaciones de divulgación en algunos medios impresos, Profesores tanto de la licenciatura como del posgrado en ciencias de la UNAM y otras instituciones.

En este proyecto hemos trabajado juntos por varios años y hemos tenido comunicación y retroalimentación de ideas constantemente. Ha sido una gran experiencia el hecho de conocer más profundamente sus trabajos de investigación, sobre las diferentes disciplinas científicas interaccionando con la física, y/o con las bases físicas. Presentamos nuestras investigaciones en Física Experimental Interdisciplinaria sobre temas de interés nacional y algunos con un fuerte contenido social y mostramos la influencia de la física en la conservación de alimentos, en biología, en medicina, la ingeniería, microscopía, rayos X, radiaciones y contaminación.

Este libro tiene el propósito de difundir nuestro trabajo de investigación con el objeto de llegar a los estudiantes de nivel medio y superior y a todos los lectores en general, pues queremos divulgar la ciencia que realizamos en nuestros laboratorios de investigación.

Finalmente deseo expresar mi enorme satisfacción por haber llegado a buen término y ojalá logremos transmitir nuestro trabajo a la futura comunidad científica, los estudiantes. Gracias a los investigadores por su participación y entusiasmo.

Esbaide Adem Chahin
Ciudad Universitaria, CDMX, 2019

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

LA FÍSICA EN LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS

*Esbaide Adem Chahin**

LAS aportaciones a los métodos de conservación de alimentos con bases físicas han sido muy importantes, numerosas y trascendentes, y han participado en los principales métodos de conservación, como el enlatado, la refrigeración y la irradiación de alimentos. La biología, la química y la nutrición también han contribuido a resolver problemas de la conservación de alimentos, en parte porque en ésta, así como en el desarrollo de la ciencia en general, el problema es dinámico. Gracias al ingenio y a la creatividad del ser humano, siempre hay nuevas ideas y se sigue trabajando constantemente, perfeccionando los métodos de conservación existentes. Debido al desarrollo tan acelerado de la ciencia y la tecnología, lo más probable es que se encontrarán, en un futuro, otros nuevos y mejores métodos de conservación.

Los métodos de conservación de alimentos actuales se desarrollaron con distintas bases principalmente: físicas y químicas y combinaciones de estas dos. La mayoría de los métodos de conservación de alimentos tienen bases físicas y son principalmente: la refrigeración, la ultra congelación, la pasteurización, la esterilización, el enlatado, la desecación, la deshidratación, la liofilización, la concentración, la presurización y la irradiación de alimentos, de la cual nos ocuparemos en este trabajo. Con bases químicas son menos numerosas y destacan principalmente en la utilización de agentes conservadores que reducen la disponibilidad del agua y que impiden el crecimiento de microorganismos, al igual que los insecticidas que controlan la proliferación los insectos.

La conservación de alimentos debe abarcar una serie de acciones que se adopten para evitar el deterioro de la calidad, garantizando su estabilidad durante el período que va desde la producción hasta el momento de su consumo. Estas acciones deben empezar con la limpieza, la selección y el empaque, entre otras prevenciones. Ningún método de conservación mejora la

* Departamento de Física Nuclear y Aplicaciones de la Radiación, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

calidad del alimento, sino que debe traerse y cuidarse desde la cosecha, la manipulación y el transporte, hasta llegar a los centros de acopio en donde se aplican los métodos de conservación adecuados. De allí se distribuyen a los centros de comercialización.



Figura 1: Refrigerador de un supermercado conteniendo vegetales.

En la figura 1 presentamos una imagen de un refrigerador conteniendo frutas y verduras, tal y como se puede ver en un supermercado. Si observamos con atención, veremos mucho orden, limpieza y selección de los productos exhibidos. Las frutas y verduras conservadas en refrigeración se encuentran en envases flexibles, y en algunos casos al vacío para su mejor conservación. En otros sistemas de refrigeradores y congeladores de la zona se hallan las carnes, pescado, embutidos, y productos lácteos, conservados algunos en congelación y otros en refrigeración. Los productos cárnicos se presentan de una manera muy atractiva, empacados en charolas especiales para contener los líquidos drenados del producto y cubiertos con un plástico flexible para evitar la deshidratación. Aquí podemos observar el

desarrollo tan importante que ha tenido la tecnología de los envases, preparados especialmente para una mejor conservación de los alimentos. La mayoría de ellos emplean las técnicas de envasado utilizando una selladora al vacío.

La historia de la conservación de alimentos desde sus orígenes por el hombre primitivo, inicia en su lucha por conseguir alimentos, y luego por conservarlos. Después de muchos esfuerzos lo lograron, contribuyendo de manera natural y rudimentaria, a los primeros métodos de conservación de alimentos, que seguramente fueron el secado al sol, y más tarde la salación. Estos métodos se deben haber descubierto por casualidad y resultaron tan eficientes que actualmente se siguen utilizando, con grandes modificaciones tecnológicas. Un ejemplo de ello podría ser el bacalao, que para su conservación utiliza principalmente el secado y el salado, se desinfecta y se almacena a temperatura ambiente para ser transportado en su oportunidad a todo el mundo. Este proceso está sustentado por bases físicas.

El enlatado es una magnífica técnica, junto con la refrigeración, para la conservación de alimentos. Podemos pensar sin temor a equivocarnos que el enlatado ha sido el método por excelencia y su origen se dio como resultado de una gran urgencia de resolver el problema alimentario de las tropas napoleónicas en campaña. Éstas se morían por infecciones estomacales ocasionadas por comer alimentos descompuestos. Se necesitaba entonces de disponer de alimentos que no se alteraran durante todo ese tiempo. Cuenta la historia que Napoleón, desesperado por la muerte de sus soldados, estableció un premio en metálico (12,000 francos) al que inventara un método de conservación de alimentos.

El maestro confitero Nicolás Appert ganó este premio en 1810, después de 14 años de experimentación. Su procedimiento consistía en colocar los alimentos en botellas de vidrio tapadas con corcho sujeto con alambre y sellados con cera o lacre, que sometía a un calentamiento en agua hirviendo durante largo tiempo. Con ello inició la técnica de conservación de alimentos por calor, llamada también appertización. Appert no supo explicar por qué su método alargaba la vida útil de los alimentos. Fue Louis Pasteur el que años más tarde atribuiría la conservación a la inactivación de los microorganismos presentes, responsables de la alteración del alimento. Las posteriores invenciones del envase hermético de hojalata y de la autoclave para la esterilización a temperaturas por encima de 100°C contribuyeron a que las conservas esterilizadas por calor se consolidaran como uno de los sistemas de conservación de alimentos más eficaces y seguros, siendo la industria de conservas la que garantiza de una manera fiable la conservación

de los alimentos.

Se inventó el enlatado, pero no se había inventado el abrelatas; los soldados para abrir sus latas usaban todo tipo de instrumentos, lo que tuvieran a la mano, inclusive la bayoneta, y no pocas las abrían a balazos¹.



Figura 2: Nicolás Appert (1749-1841).

El envase en lata resultó ser un sistema extraordinario de conservación de alimentos y fue perfeccionado por científicos y tecnólogos a través del tiempo. Sufrió una serie de transformaciones y optimizaciones, hasta llegar a lo que se conoce actualmente como latas con tapa abre fácil.

Desde entonces no había surgido ningún otro método novedoso y atractivo que pudiera ser tan revolucionario como lo fue en su tiempo el envase en lata -hace dos siglos- hasta el surgimiento de la irradiación de alimentos, muchos años después.

LA IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS CON UN HAZ DE ELECTRONES

En el fotomontaje de la Figura 3 se representa la irradiación de los alimentos con un haz de electrones. El conjunto de frutas, verduras, pescado y cereales se encuentra irradiándose con un haz de electrones real. Este efecto fue producido con el haz de electrones del acelerador Van de Graaff de

¹El lector interesado en la historia universal de aquella época, encontrará anécdotas muy atrayentes, por el ejemplo, los datos históricos del envasado, en la entrada de Wikipedia sobre la vida de Nicolás-François Appert, quién fue un maestro confitero y cocinero francés e inventor.

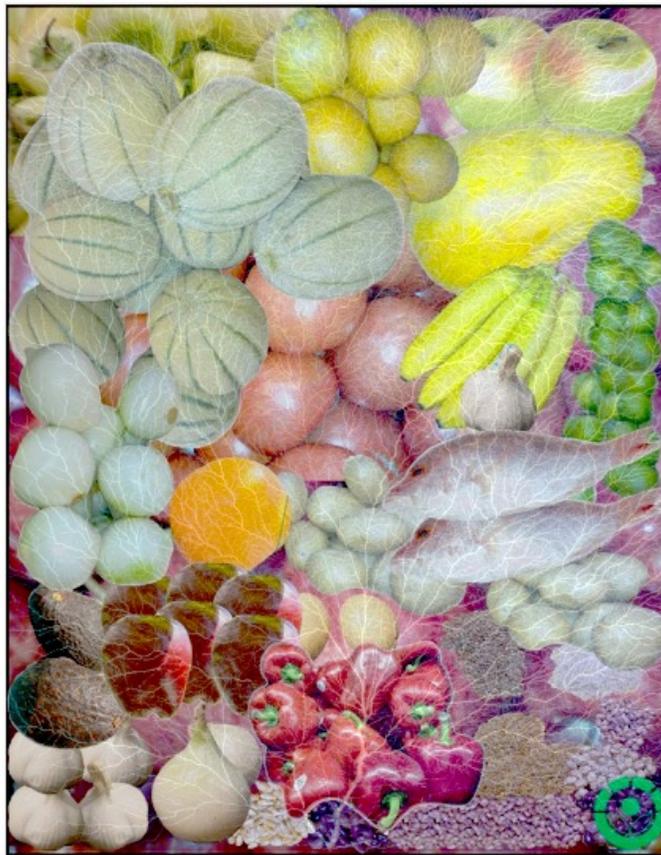


Figura 3: Fotomontaje de la irradiación de alimentos.

2 MV del Instituto de Física de la UNAM. Sobre una placa de polimetilmetacrilato (PMMA), que es un polímero aislante y transparente, con la propiedad de almacenar la energía de los electrones, y al descargarse la placa se produce la imagen, sobre una superficie llamada Figura de Lichtenberg o arborescencia eléctrica. Se cree que el patrón de descarga se extiende como fractal aún hasta el nivel molecular. Abajo a la derecha presentamos el logotipo que deben portar todos los alimentos que han sido irradiados.

Los primeros estudios de la irradiación de alimentos se iniciaron hacia 1943 en Oak Ridge, Tennessee, Estados Unidos, originados por una gran necesidad. Se buscaba un método útil para esterilizar alimentos y que éstos se pudieran almacenar por años, sin refrigeración.

Se promovió la investigación en la irradiación de alimentos en casi todos

los países. Muchos de estos estudios fueron patrocinados por organismos internacionales, logrando magníficos resultados.

Los primeros alimentos esterilizados por radiación se empezaron a usar en hospitales para pacientes con sistemas inmunológicos gravemente dañados y también se empezaron a utilizar en los viajes espaciales; los astronautas comenzaron a llevar sus alimentos esterilizados por radiación.

Sin embargo, a nivel masivo hubo mucho rechazo por parte de los consumidores por temor al uso de las radiaciones en la conservación de los alimentos. Ha sido el método de conservación más estudiado, y más controvertido; ha habido mucha difusión de los resultados encontrados y se ha demostrado y explicado en todos los idiomas que ningún alimento tratado por radiación se vuelve radioactivo.

Los organismos internacionales han legislado acerca del tipo de fuentes de radiación que se pueden utilizar, los niveles de energía de las fuentes de radiación y los alimentos que fueron aprobados, así como las dosis que se pueden utilizar para cada alimento.

En 1976 el Comité Mixto OIEA/OMS/FAO, -Organismo Internacional de Energía Atómica; Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación- aprobó los tratamientos con radiaciones de algunos productos alimenticios y después de 1976 el número de autorizaciones provisionales o experimentales se multiplicó rápidamente.

El empleo de este sistema de conservación quedó confirmado en 1984 con el proyecto de reglamentación propuesto por la oficina de Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA). Este organismo sirve de foro y modelo para numerosos países en lo referente a los aspectos legislativos de la higiene alimentaria. Esta aprobación se llevó a cabo casi cuatro décadas después de que se iniciaron los primeros estudios.

UN PEQUEÑO REPASO SOBRE LAS RADIACIONES IONIZANTES

La radiación ionizante agrupa a rayos X y gamma, partículas cargadas, alfa, beta, electrones y protones. Todas ellas pueden interaccionar con los electrones de los átomos del material de dos maneras: como Formación de Iones y Formación de Especies Excitadas.

- 1.- Formación de iones Las partículas cargadas, tales como protones o electrones, pierden energía al colisionar con los átomos de un medio, ya sea sólido o gaseoso. Como resultado de estas colisiones, algunos de los electrones de los átomos pueden

ser expulsados fuera de éstos, dando lugar a la formación de especies con carga, denominadas iones. Se forma, pues un ion positivo y un electrón:



La **A** representa un átomo cualquiera, **A⁺** el ion positivo formado, **e⁻** un electrón. Este proceso recibe el nombre de ionización o formación de iones. El electrón expulsado puede tener energía suficiente como para producir en el material irradiado una ionización. De manera similar, radiación electromagnética de ciertas energías puede producir el efecto fotoeléctrico, ionizando también los átomos.

2.- Formación de Especies Excitadas

Durante las colisiones, puede ser que la mayoría de las partículas no tengan suficiente energía para arrojar un electrón del átomo y sólo se ocasione que dicho electrón pase a un estado de mayor energía. Se dice entonces que el átomo sufrió una excitación. Así, el paso de la radiación a través del material va dejando un camino de átomos o moléculas ionizadas y excitadas.

Cuando la radiación electromagnética interacciona con la materia, lo hace por medio de tres procesos (el efecto fotoeléctrico, el Compton y la producción de pares). Como consecuencia de ellos se liberan electrones, los cuales, como se mencionó anteriormente, dan origen a ionizaciones y/o las excitaciones posteriores. Las moléculas cuyos átomos fueron excitados o ionizados se descomponen y dan lugar a un cambio químico mediante la formación de otras especies muy reactivas, como son los radicales libres (llamados así por tener un electrón desapareado); también pueden formarse iones y moléculas neutras más pequeñas.

Estos cambios ocurren simultáneamente y como consecuencia final se producen modificaciones en los materiales irradiados que dependen de las dosis suministradas. Cuando éstas son bajas, producimos efectos pequeños que se pueden controlar y que varían según la cantidad de energía suministrada e ir desde la esterilización de los insectos, que no se mueren pero ya no se reproducen, hasta la esterilización de los productos cárnicos, en donde eliminamos completamente los microorganismos presentes en los alimentos como virus, bacterias, hongos, levaduras y otros que producen su descomposición.

Entonces podemos preguntarnos ¿cómo interaccionará la radiación con los alimentos?. También lo hacen por medio de estos dos procesos: la excitación y la ionización. Esto produce desplazamientos atómicos y cambios químicos en los microorganismos, en los insectos y por supuesto también en los componentes nutricionales de los alimentos.

En el caso de los materiales biológicos, se produce la muerte de los microorganismos, se altera el ciclo de vida de los insectos, también, con dosis muy bajas se logra retardar la maduración de las frutas, y se inhibe el crecimiento de los brotes en las papas y cebollas. Las aplicaciones para esta técnica en el campo de la conservación de los alimentos es muy amplia y depende de la dosis suministrada.

Es fundamental recalcar que los alimentos irradiados no se vuelven radiactivos ni hacen daño a las personas que los consumen.

El empleo de las fuentes de radiación, así como su energía, se encuentra legislado por los organismos internacionales. Por ejemplo, la energía permitida para el uso los electrones acelerados son de hasta 10 MeV (millones de electrón-volts), de esta manera se garantiza que cuando el haz de electrones interacciona con la materia, lo hace a nivel atómico y produce en los átomos las ionizaciones esperadas y las excitaciones. Con estas energías el haz de electrones pasa muy lejos del núcleo y como consecuencia no hay reacciones nucleares, por lo que no se induce radioactividad.

CARACTERIZACIÓN DEL HAZ DE ELECTRONES

Dosimetría cualitativa

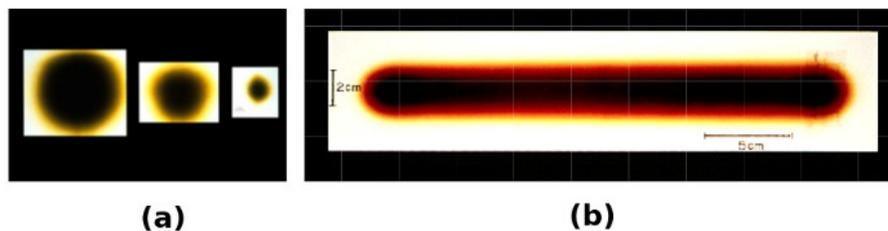


Figura 4: (a) Haz fijo; (b) Haz barrido

Caracterización del haz de electrones con películas de policloruro de vinilo (PVC) irradiadas. A la izquierda Figura 4(a) el haz fijo a diferentes distancias de la salida del haz, y a la derecha Figura 4(b), el haz barrido. La utilización de una u otra forma depende de los requerimientos necesarios

para realizar la irradiación y también de cada producto a irradiar. Estas imágenes nos muestran la localización, la forma y el tamaño útil del haz, para la óptima colocación de las muestras que se van a irradiar.

Dosimetría cuantitativa

Dosis de absorción es la energía absorbida por unidad de masa del material irradiado. Su unidad es el Gray (Gy), que es igual a un joule de energía absorbida por kilogramo de material. Sus equivalencias son:

1 Gy	1 J/kg
1 kGy	1 kJ/kg
1 kGy	1 kWs/kg
1 kGy	100 krad
1 kGy	0.1 Mrad
1 kGy	0.24 cal/g

Para medir la dosis de absorción se pueden utilizar diversos tipos de dosímetros comerciales, dependiendo del producto que se vaya a irradiar. Es conveniente que el dosímetro sea lo más parecido a la muestra. Se emplean dosímetros como las películas de tinte radiocrómico (PTR), en el cual se produce un cambio de color que, según las dosis, es la intensidad del color. También se pueden utilizar dosímetros líquidos como la solución de sulfato ferroso, que al irradiarse se transforma en sulfato férrico; a este dosímetro también se llama Dosímetro de Fricke. Igualmente, se utilizan dosímetros de fluoruro de litio en polvo o en cristal, como el dosímetro termoluminiscente. Este dosímetro se puede contener en recipientes similares a la muestra, como en el caso de los granos de maíz. El polvo de fluoruro de litio se colocaba en unas cápsulas de gelatina y se enviaba junto con el maíz a granel. Para determinar los cambios en el color se utiliza un espectrofotómetro. Para el fluoruro de litio se utiliza un medidor termoluminiscente, que emite luz al calentar el dosímetro sobre una placa.

La razón de dosis

Es la dosis por unidad de tiempo y es igual a kGy por segundo, por minuto, o por hora.

Dosis empleadas en la irradiación de los alimentos

Las dosis empleadas en la irradiación de alimentos varían en un margen muy amplio según el objetivo que se pretenda y se clasifican en dosis bajas, dosis medias y dosis altas. Los datos correspondientes se hallan en la siguiente tabla:

DOSIS BAJAS	DOSIS MEDIA	DOSIS ALTAS
Hasta 1 kGy	de 1 kGy a 10 kGy	De 10 kGy a 50 kGy
a) Inhibición de la germinación	Prolongación del período de conservación	Esterilización,
b) Desinfestación de insectos	Reducción de la carga microbiana	Eliminación de levaduras, hongos, bacterias y virus
c) Retraso de la maduración		

Aplicaciones de la radiación

Las dosis baja y media son las que cuentan con mayor número de productos que se pueden irradiar y están aprobados por las autoridades y aceptados por el público. Entre las aplicaciones de irradiación más importantes se pueden resaltar: cereales, especias, papas, cebollas, condimentos, carnes rojas y pollos:

Dosis utilizadas

Inhibición de brotes	0.1 - 0.2 kGy
Desinfestación de insectos	0.3 - 0.5 kGy
Control de parásitos	0.3 - 0.5 kGy
Retraso de la maduración	0.5 - 1.0 kGy
Control de hongos	1.5 - 3.0 kGy
Control de bacterias	1.5 - 3.0 kGy
Esterilización	15 - 30 kGy

La irradiación se utiliza para eliminar de forma efectiva los organismos que producen enfermedades transmitidas por los alimentos, como *Salmonella* y *Escherichia coli* (*E. coli*).

La irradiación se puede usar para destruir o inactivar la acción de organismos que producen la descomposición y para extender la vida de los alimentos en el anaquel.

También se puede usar para destruir insectos en el interior o sobre frutas tropicales. Además, la irradiación disminuye la necesidad de usar otras

prácticas para el control de plagas que pueden dañar los productos. También causan un retraso en la germinación y la maduración.

La irradiación se usa para esterilizar alimentos que luego se pueden almacenar por años, sin refrigeración. Los alimentos esterilizados se utilizan en hospitales para pacientes con sistemas inmunológicos gravemente dañados.

Los alimentos esterilizados por medio de la irradiación están expuestos a niveles de tratamiento sustancialmente mayores que aquéllos que se aprobaron para uso normal.

La esterilización de alimentos es muy importante tanto para los viajes espaciales, como para la alimentación suministrada a los enfermos delicados; en ambos casos se esteriliza por radiación. Y al hacerlo así, esterilizamos también los empaques que los contienen. Los astronautas llevan sus raciones alimenticias esterilizadas por radiación. Este método de esterilización fue apoyado por la NASA desde su principio, ya que tenía la necesidad de resolver el problema de la alimentación de los astronautas en el espacio.

EL ACELERADOR VAN DE GRAAFF DE ELECTRONES

Es un instrumento que cambia la velocidad de una partícula cargada, como un ión y un electrón.

En la Figura 5 se muestra una fotografía del acelerador Van de Graaff de 2 MV del Instituto de Física de la UNAM, con un diagrama del acelerador simulando el proceso de la irradiación de alimentos (Papas).

Funcionamiento

El acelerador se encuentra cubierto por un tanque (a) que lo aísla de la atmósfera, y permite hacerle un vacío mecánico para posteriormente presurizarlo mediante una mezcla de gases bióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno. La carga eléctrica es depositada en la banda (e) quien acarrea las cargas a la terminal de alta tensión (b) estableciéndose así una diferencia de potencial con respecto a la base.

Los electrones se producen en un filamento incandescente (c) dentro de la terminal y son acelerados en el campo electrostático creado por la diferencia de potencial entre la terminal y la base del acelerador adentro del tubo acelerador (d), formando un haz de electrones con alta energía. El haz sale del acelerador a través de una ventana de titanio; en este caso es un haz barrido (f) que se emplea para la irradiación de los alimentos (g), los cuales se desplazan adentro de una charola sobre una banda transportadora.

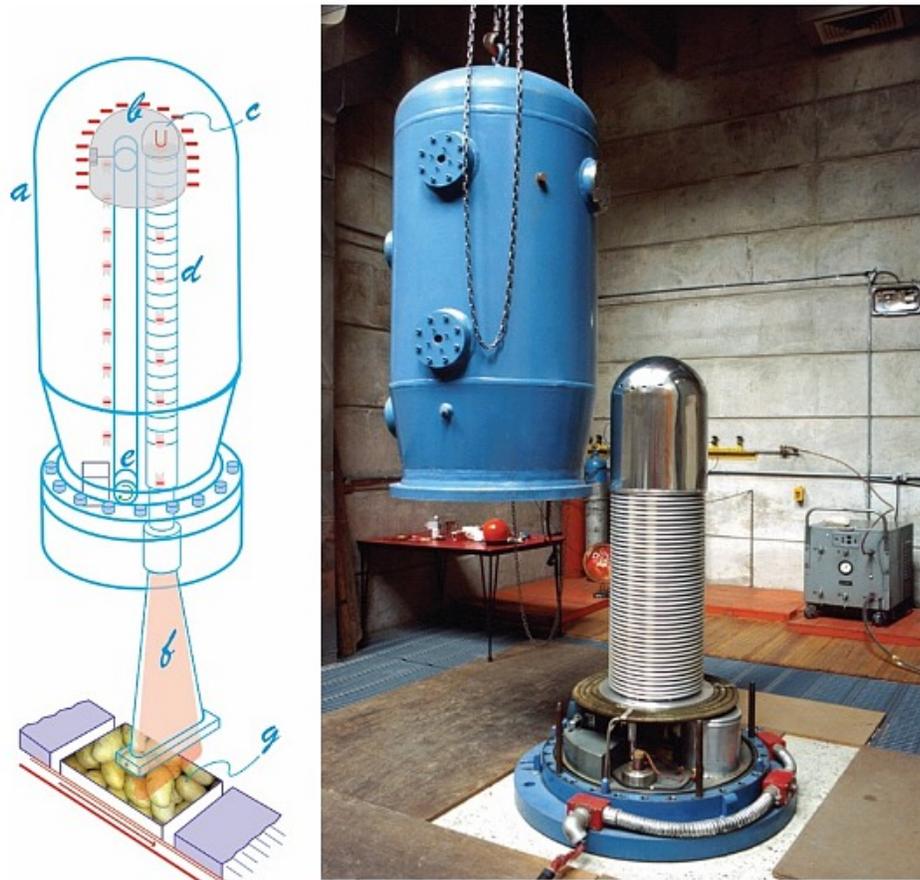


Figura 5: El acelerador Van de Graaff de electrones.

Planta piloto para la irradiación de maíz a granel

Para el diseño y la construcción de la planta piloto se tuvo que aplicar una buena dosis de ingenio y creatividad. Los detalles se encuentran en la Figura 6 donde se esquematiza una planta piloto para la desinfestación de maíz por irradiación con una capacidad de 200 kg cada hora.

Esta planta fue diseñada en el Instituto de Física de la UNAM para trabajar de manera acoplada con el acelerador de electrones Van de Graaff. Su funcionamiento es el siguiente: en el depósito (a) se coloca la muestra de maíz que se va a irradiar, y puede ser hasta 200 kg. La operación de este sistema se inicia de la siguiente manera: Se acciona una válvula y el maíz

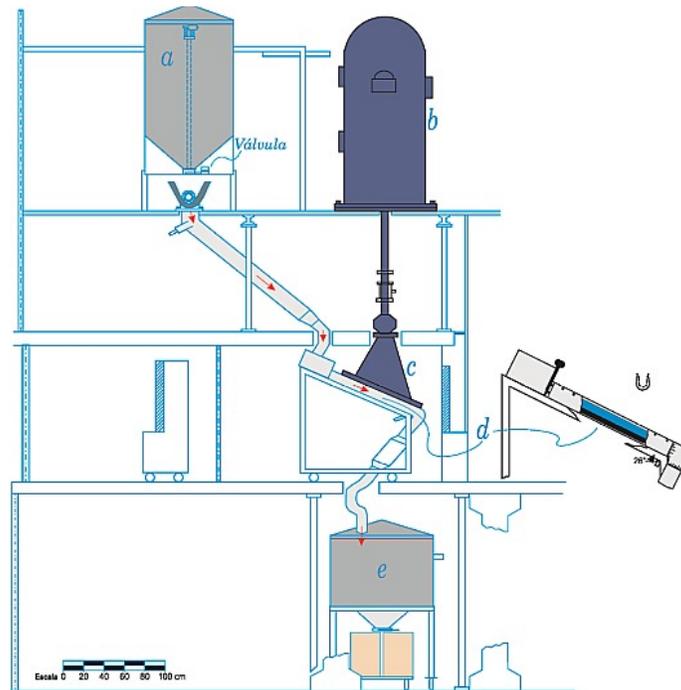


Figura 6: Planta piloto para la irradiación de maíz a granel.

empieza a caer por gravedad, simultáneamente el haz de electrones barre toda la zona del canal, para que en el instante en que va pasando el maíz por el canal (d) reciba la dosis de radiación adecuada para interrumpir el ciclo de vida de los insectos. Esto lo hace en unos pocos segundos y así sigue su recorrido por gravedad como lo indican las flechas, hasta llegar al depósito (e) en donde finaliza el proceso de irradiación, la muestra es retirada de (e) y continúa con la etapa almacenamiento y control de plagas, verificado mediante estudios entomológicos².

Los comentarios finales de este revolucionario método de conservación son que la irradiación de alimentos, aunque parece que se puede usar para todos los alimentos, no es siempre factible. Lo recomendable es usar las dosis bajas, porque para dosis altas los cambios son grandes y modifican las propiedades organolépticas como el color, el olor, el sabor, y la textura.

Un alimento debe ser atractivo y agradable a nuestros sentidos, además

²Para mayores detalles consultar: Diseño y construcción de una planta piloto IFUNAM-74-408; PT-F-74-16 (1974); Disinfestation of maize by irradiation, Radiat. Phys. Chem. 9, 763-768 (1977).

del objetivo fundamental de ser nutritivo y que hay que preservar. De aquí vuelvo a la imagen con la que inicié este trabajo: un refrigerador lleno de vegetales que son muy apetecibles a nuestros sentidos y solamente de verlos se nos antoja preparar inmediatamente una buena ensalada.

La irradiación de alimentos, siendo un gran método de conservación, debe tomarse como una alternativa más y participar junto con los otros métodos como el enlatado, la refrigeración y la deshidratación. Hasta ahora todos los métodos de conservación son magníficos y se pueden usar solos, o combinados, pero el problema de la conservación de alimentos de manera general no está resuelto todo, sólo parcialmente pues se siguen echando a perder muchos alimentos. Y hay mucha hambre en el mundo.

Entre los problemas con los que se enfrenta la humanidad es el incremento constante de la población, más no en la misma proporción: la producción y la conservación de los alimentos: se siguen perdiendo muchos alimentos.

Hay que continuar buscando nuevos rumbos. El desarrollo de la ciencia y la tecnología cabalga velozmente y pronto nos darán grandes sorpresas: cabalgaremos a su lado aportando nuestro ingenio y creatividad para encontrar los nuevos métodos para la conservación de los alimentos en el futuro.

Nuestro trabajo de irradiación de alimentos a nivel laboratorio con el acelerador Van de Graaff está terminado. El trabajo actual desde hace algún tiempo lo hemos enfocado al área de polímeros, Así pues, hemos trabajado con: Nylon 6, Polietileno, Policloruro de vinilo, Polietilentereftalato, Policaprolactona y Poliuretano, haciendo mezclas en algunos casos con polímeros reciclados. Dada nuestra experiencia en este campo, la usaremos en el desarrollo de los empaques de los alimentos, buscando lograr nuevos materiales poliméricos para los envases que resultaran más amigables con la naturaleza. La idea es tener el alimento empacado utilizando estos materiales u otros con características similares y cuando se irradie el alimento para su conservación, se esterilice simultáneamente el envase y que éste último sea de un material tal que no resulte tóxico ni se degrade al ser irradiado.

AGRADECIMIENTOS

A DGAPA-PAPIIT-UNAM-IN103516 por su apoyo brindado para el desarrollo del proyecto, ya que durante su patrocinio escribí este capítulo y coordiné el libro.

BIBLIOGRAFÍA

Kume T., Furuta M., Todoriki S., Uenoyama N. y Kobayashi Y. *Status of food irradiation in the world*. Radiation Physics and Chemistry 78, 222-226 (2009).

Morales J., Adem E. *La Irradiación de los Alimentos*. Cuadernos de Nutrición, Documento 12 No.2, 17-32. Instituto Nacional de la Nutrición Salvador Zubirán (INNSZ).CDMX. (1989).

Adem E. , Uribe R. , de La Piedad A., Reyes J. . *Disinfestation of maize by irradiation*. Radiat. Phys. Chem. 9, 763-768 (1977).

Adem E., Reyes J., Ramos J.M., Velázquez V.F. *Desinfestation de maíz por irradiación a escala piloto. diseño y construcción de una planta piloto para la desinfestación de maíz a granel con electrones*. IFUNAM-74-408; PT-F-74-16 (1974).

Uribe R. M., de la Piedad A., Adem E. *Dosimetry in a pilot plant for bulk disinfection of grain by electron irradiation I.- Lithium fluoride in powder*. Instituto de Física, UNAM, IFUNAM-75-26 (1975).

Navarro R., Burillo G., Adem E. y Marcos-Fernández A. *Effect of Ionizing Radiation on the Chemical Structure and the Physical Properties of Polycaprolactones of Different Molecular Weight*. Polymers 2018, 10(4), 397 ; (2018).

Marcos-Fernández A., Adem E., Rubio Hernández-Sampelayo A., Báez J.E., Palacio L., Prádanos P., Tena A., Hernández A. *Elimination of the Crystallinity of Long Polyethylene Oxide-Based Copolymers for Gas Separation Membranes by Using Electron Beam Irradiation*. Macromolecular Chemistry and Physics, 1, Pag.1-8. (2017).

Adem E., Angulo-Cervera E., Gonzalez-Jimenez A., Valentin J.L., Marcos-Fernández A. *Effect of Dose and Temperatura on the Physical Properties of an AliphaticThermoplastic Polyuretane Irradiated With an Electron Beam*. Radiation Physics and Chemistry, 112, 61-7 (2015).

Adem E., Burillo G., del Castillo L.F., Vásquez M., Avalos-Borja M., Marcos-Fernández A. *Polyamide-6: The Effects on Mechanical and Physicochemical Properties by Electron Beam Irradiation at Different Temperatures*. Radiation Physics and Chemistry, 97, 165-171 (2014).

Adem E., Rubio Hernández-Sampelayo A., Báez J.E., Miranda J., Labrada-Delgado G.J., Marcos-Fernández A. *Physical Properties of Biaxially oriented Poly (Ethyleneterephthalate) Irradiated at Different Temperaturas and Doses With Electron Beam*. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 5-11 (2017).

EL MICRO Y EL NANO-MUNDO, VISTOS A TRAVÉS DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO

*Miguel Avalos Borja**

LA curiosidad del ser humano por ver más allá de lo que el ojo es capaz, ha llevado a la humanidad a desarrollar diferentes instrumentos y técnicas para extender las capacidades que la naturaleza nos ha dado para observar y estudiar el mundo. Así, alrededor del año 1600 apareció en Holanda una propuesta novedosa desarrollada en parte por Hans Janssen, Zacarias Janssen y el alemán Hans Lippershey que dio origen a dos grandes instrumentos, el microscopio y el telescopio. Estos científicos demostraron que alineando lentes en un tubo podían hacer que los objetos lejanos se vieran más cerca y los objetos muy pequeños se vieran más grandes (desde luego con diferente arreglo para cada caso). Galileo tomó la idea y apuntó el telescopio al cielo para observar los cráteres de la Luna, las manchas solares, las lunas de Júpiter y los anillos de Saturno, para de paso confirmar que la Tierra no era el centro del universo y también que, por asociación con lo observado, la Tierra debería ser redonda, al igual que las estrellas y planetas observados. Por esos descubrimientos tan novedosos casi lo mandan a la muerte en la hoguera. De manera semejante, el holandés Anton Van Leeuwenhoek optimizó el microscopio óptico y logró ver bacterias, hongos, glóbulos rojos y muchos animalitos nadando en una gota de agua, dando origen a la investigación de las cosas más pequeñas que las que el ojo humano puede ver sin ninguna ayuda.

Sin embargo, a pesar de todos esos descubrimientos y adelantos, se llegó al punto en que el microscopio óptico carecía de la resolución necesaria para ver detalles más pequeños. Así, por ejemplo, observar los virus para poder estudiarlos y tratar de encontrar la manera de destruirlos y por lo tanto, poder tener curas para los males generados por ellos. La limitante fundamental para que el microscopio óptico fuera utilizado para este propósito es que la distancia entre objetos más pequeños que se puede discernir

*Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, División de Materiales Avanzados, San Luis Potosí, S. L. P.

(llamada "resolución"), depende fundamentalmente de la longitud de onda de la luz que se utilice en el microscopio óptico para formar la imagen. Dicha longitud de onda más pequeña corresponde al azul y es de alrededor de 400 nanómetros (nm). Así que en principio es imposible ver detalles más pequeños que 400 nm utilizando un microscopio óptico.

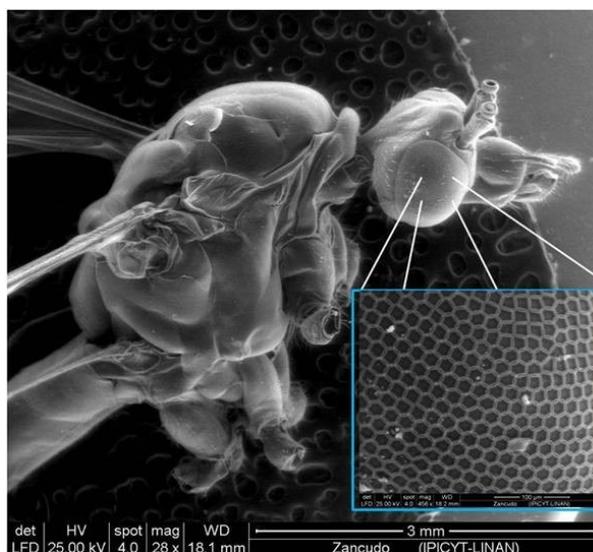


Figura 1: Imagen de un zancudo gigante (Tipulidae) visto a través del microscopio electrónico de barrido. En el recuadro se ven detalles del ojo compuesto. Foto cortesía de Gladis Labrada (IPICYT).

Un adelanto considerable hacia el objetivo de ver detalles más pequeños se logró cuando se pudieron diseñar y operar instrumentos que funcionan con ondas de período más pequeño que las de la luz. En este caso, dichas "ondas" corresponden a electrones que viajan a alta velocidad. Los electrones acelerados por diferencias de potencial de miles de voltios se comportan como si fueran ondas con un periodo mucho menor a 1 nm. Por ejemplo, electrones acelerados con una diferencia de potencial de 100,000 eV tienen una longitud de onda de 0.0037 nm. Por lo tanto, dichos instrumentos serán capaces de tener mejor resolución que un microscopio óptico. Esos microscopios reciben el nombre de microscopios electrónicos, para hacer notoria su diferencia con los convencionales que usan luz. Existen 2 grandes grupos de microscopios electrónicos; los llamados microscopios electrónicos de barrido (MEB por sus siglas en español o SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscopy)) y los microscopios electrónicos

de transmisión (MET por sus siglas en español o TEM por sus siglas en inglés (Transmission Electron Microscopy)).

Ambos instrumentos MEB o MET, tienen características particulares, ventajas y desventajas de unos con respecto a otros. Comenzaremos explicando un poco las características del MEB. Una de las ventajas de esta técnica es que para muchos problemas de la vida diaria la preparación de muestras es mínima o nula. Ejemplo de esto es la observación de un mosquito (Figura 1). En esta imagen se pueden observar la cabeza, el tronco, el inicio de las alas, etc. En el recuadro se pueden apreciar los detalles del ojo compuesto del mosquito. Esta imagen está tomada a cerca de 500 aumentos, que es más o menos la mitad de la amplificación máxima de un microscopio óptico. Por tanto, si queremos analizar más detalles sólo nos queda el camino de los microscopios electrónicos que tienen mayor resolución.

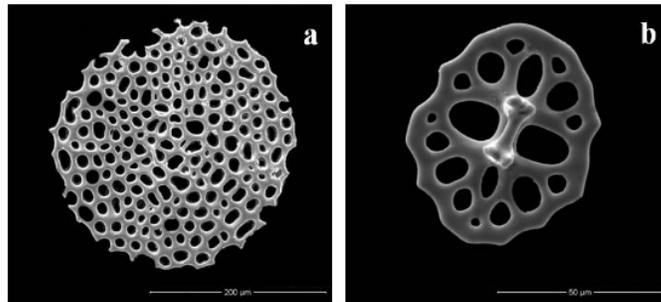


Figura 2: a) Espícula tipo placa perforada de carbonato de calcio, presente en los pies ambulacrales de pepinos de mar (Género: *Neothyonidium*). Aumento 400X. b) Espícula tipo mesa, de carbonato de calcio, presente en la piel de pepinos de mar (Género: *Massinium*). Aumento 3000X. Muestras y fotos cortesía de Carolina Olgúin (Facultad de Ciencias, UNAM).

La Figura 2 muestra imágenes de espículas de pepinos de mar de pies ambulacrales y piel, respectivamente. Esta última está tomada originalmente a 3000 aumentos, lo cual ya está fuera del alcance de un microscopio óptico, por lo que para hacer clasificaciones de estos organismos tienen que observarse por estos medios.

Una de las grandes ventajas del MEB es que la interpretación de las imágenes es muy intuitiva y no requerimos de ninguna manipulación profunda para entenderlas. Esto lo podemos ver claramente al estudiar las formas de crecimiento de cristales de óxido de zinc bajo diferentes condiciones de preparación, como se ilustra en la Figura 3. Las imágenes tienen un claro carácter tridimensional y una gran profundidad de campo, comparadas con

lo que se observaría en microscopía óptica, si ello fuera posible.

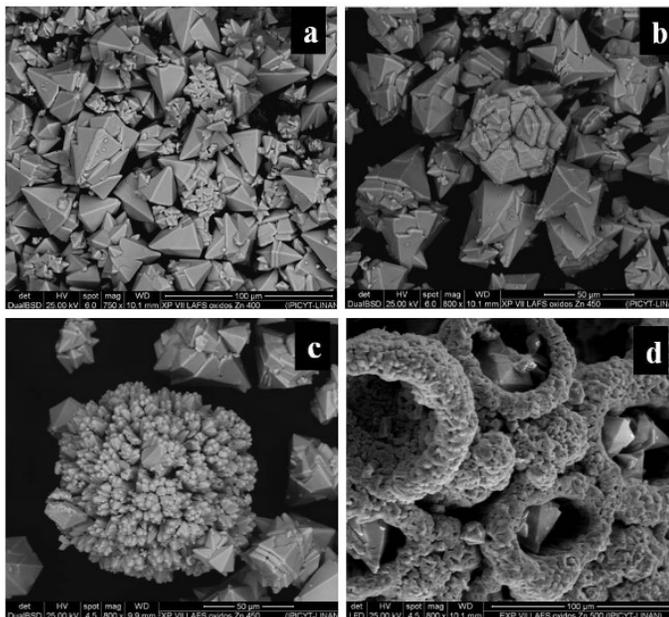


Figura 3: Diversas estructuras de óxido de zinc. a), b) micropirámides; c,d) microflores. Muestras y fotos cortesía de Luis Flores y Juan Manuel Quintana, (UABC, campus Tijuana).

Una ventaja adicional de utilizar microscopía electrónica, es que analizando las energías de los rayos X producidos cuando los electrones del cañón chocan con la muestra, se puede saber la composición química de la misma, esto es, que elementos de la tabla periódica la componen y en qué porcentaje. Esta técnica se conoce popularmente como EDS (por si siglas en inglés de Energy Dispersive Spectroscopy). Un ejemplo de esto se ilustra en la Figura 4, que corresponde al análisis químico de muestras como las de la Figura 3. En él podemos ver que los únicos elementos químicos presentes son el zinc y el oxígeno, y por lo tanto, no hay impurezas de ningún tipo adquiridas en el proceso de síntesis de la muestra.

Además de hacer análisis químico de las muestras, uno puede también graficar la posición espacial en donde se encuentren los elementos. Esto se conoce como “mapas” químicos, y sirven para conocer la distribución espacial de los componentes químicos. La Figura 5 muestra una imagen compuesta que ilustra esta técnica. En la parte izquierda hay una imagen de MEB convencional donde se observa la partícula bajo análisis. En tres pun-

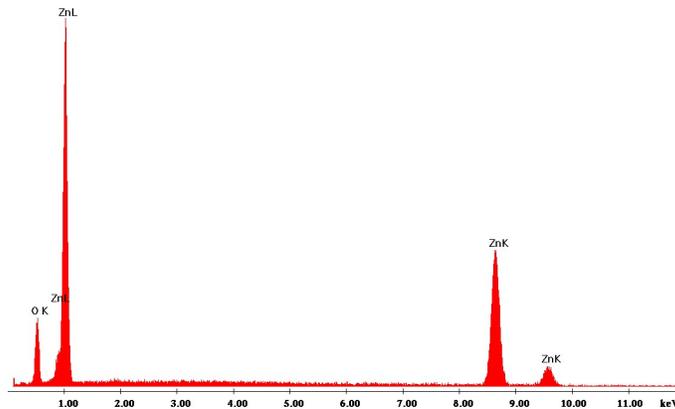


Figura 4: EDS de las muestras de la Figura 3. Solo se detecta presencia de zinc y oxígeno.

tos diferentes se muestran los espectros químicos EDS correspondientes. Y a la derecha se muestran los mapas químicos del bario, plomo y antimonio, respectivamente. Los colores de los mapas son artificiales y no quiere decir que los elementos analizados tengan ese color. Son sólo ayudas estéticas para el ojo, ya que las imágenes de electrones o mapas químicos no poseen ningún color.

Cabe mencionar que hasta hace algunos años todos los microscopios de barrido estaban diseñados para trabajar dentro de sistemas de vacío, lo cual hacía la observación de muestras biológicas casi imposible. Al poner una muestra biológica en un sistema de vacío el agua se evapora y el tejido se colapsa. Por lo tanto su observación requería de preparaciones muy elaboradas que hacían la observación en condiciones muy alejadas de las naturales de la muestra en cuestión. Recientemente se han desarrollado MEBs que funcionan de tal manera que el ambiente alrededor de la muestra es muy cercano, en presión y humedad, al ambiente en donde estaría la muestra en su estado natural. Estos microscopios se denominan “ambientales” o de “bajo vacío”, dependiendo de cada marca que lo comercialice. En la Figura 6 mostramos imágenes de varias estructuras biológicas casi en su estado natural. Como se observa, no están colapsadas ni deshidratadas, ni han requerido de preparaciones elaboradas, lo cual hace su observación mucho más rápida.

Es indiscutible que el MEB representa un gran adelanto respecto al microscopio óptico, tanto en su poder de resolución (1 nm para un equipo con

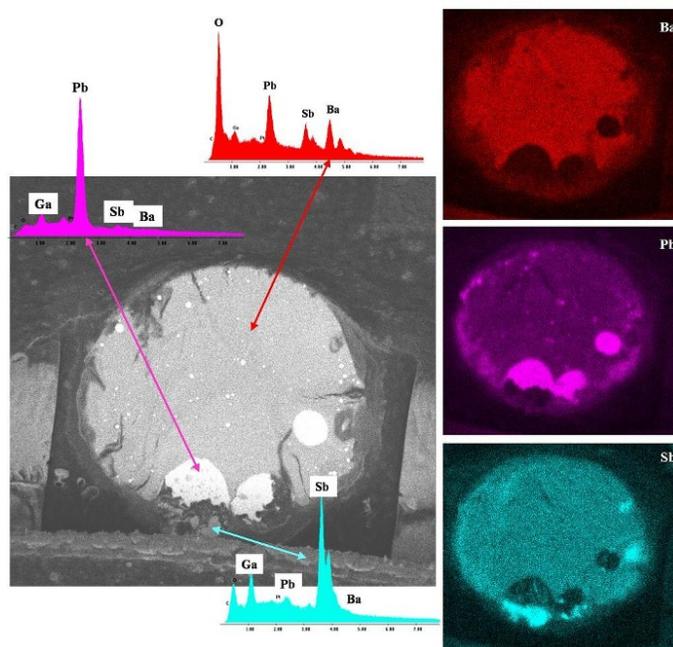


Figura 5: Imagen izquierda en blanco y negro correspondiente a la partícula a analizar, junto con 3 espectros EDS. Derecha, los mapas químicos de bario, plomo y antimonio. Muestra y fotos cortesía de Edgar Peralta (IPICyT).

cañón de emisión de campo), como en la posibilidad de obtener más información de la muestra como es el análisis químico y la distribución elemental, o sea, los mapas químicos. Sin embargo, aún hay objetos interesantes de estudiar que requieren más resolución, como son los virus, las nanopartículas metálicas (fundamentales para la catálisis), los nanotubos, grafenos, etc. cuyas dimensiones son del orden de los nanómetros. Por otra parte, podríamos estar interesados en el “interior” de los objetos. Por ejemplo, conocer lo que hay dentro de una célula, o saber cómo están acomodados los átomos dentro de una partícula catalítica. Para cualquiera de estos dos casos, alta resolución o interior de los objetos, la mejor opción es la microscopía electrónica de transmisión. Para este propósito utilizamos los electrones que atraviesan la muestra y de ahí su nombre MET. En este caso, la preparación sí es más elaborada porque la zona a observar tiene que ser suficientemente delgada, menor que unos 100 nm (0.1 micrómetros). En el caso de muestras biológicas, el camino más común es hacer cortes con ultramicrotomos y en el caso de muestras físicas se puede usar molienda mecánica o adelgaza-

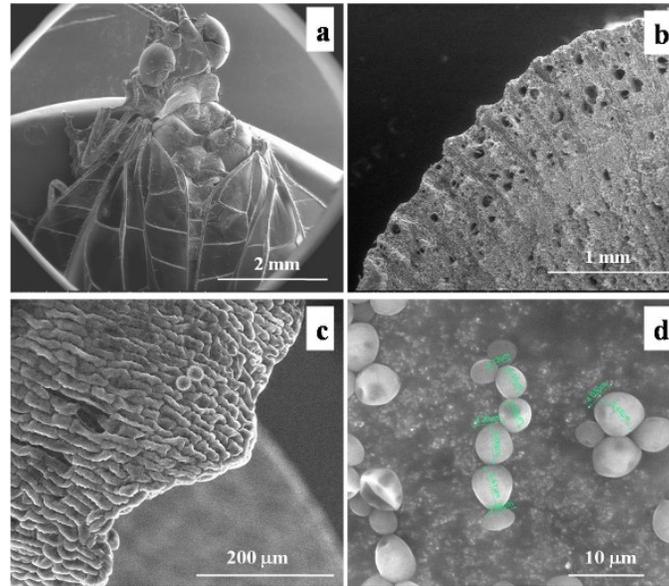


Figura 6: Diversas muestras biológicas vistas en modo ambiental a diferentes presiones: a) insecto, 51 Pa. Foto cortesía de Gladis Labrada y Araceli Patrón (IPICyT); b) Sección transversal de un tallo de vid, 80 Pa. Muestra cortesía de Ernestina Castro (CICESE) y foto de Edgar Peralta (IPICyT); c) Sección de una flor con 2 granos de polen, 121 Pa. Muestra cortesía de Braulio Gutiérrez (IPICyT), foto cortesía de Edgar Peralta (IPICyT). d) levaduras, 294 Pa. Muestra cortesía de Lina Riego (IPICyT), foto cortesía de Edgar Peralta (IPICyT).

miento electroquímico o iónico.

La Figura 7 muestra dos imágenes de MET de cortes finos biológicos que muestran las alteraciones en la mielina de fibras nerviosas de cerebro de rata cuando están expuestas a arsénico.

El microscopio de transmisión permite diferenciar la morfología de partículas muy pequeñas, en el intervalo de nanómetros (1×10^{-9} m). En la Figura 8 se aprecian distintas nanopartículas de oro (triangulares, hexagonales, decaedrales, etc.) como un ejemplo de la variedad de formas y contrastes que pueden ser observados por esta técnica. El contraste observado por MET permite conocer detalles como el espesor relativo de las muestras y en algunos casos, mediante la obtención de patrones de difracción, como el observado en la Figura 8(e), su carácter amorfo o cristalino; además el MET permite obtener información química y estructural, con precisión de nanómetros teniendo la capacidad de resolver átomos (como veremos más

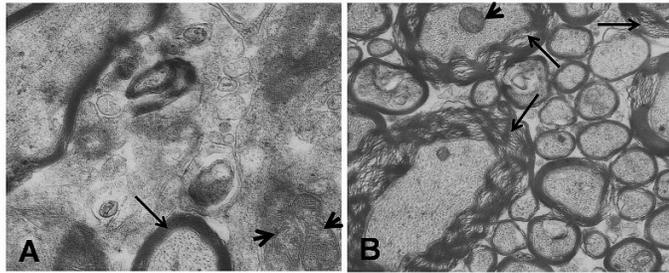


Figura 7: Cortes de cerebro de rata. A) Grupo de control mostrando los axones con su vaina de mielina íntegra (flechas), 200,000 X. B) Grupo expuesto a arsénico. Se observan los axones con su vaina de mielina con morfología alterada (flechas), 100,000X. Muestra cortesía de Martha Santoyo (Facultad de Medicina, UASLP) y fotos cortesía de Araceli Patrón (IPICyT).

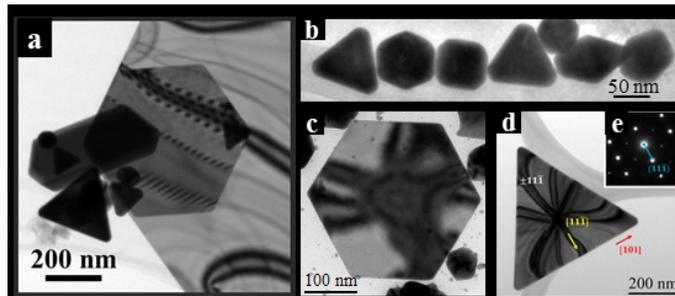


Figura 8: Diversas partículas de oro (a, b, c, d) generadas usando síntesis coloidal, (e) Patrón de difracción de electrones obtenido de la partícula triangular mostrada en (d). Muestra cortesía de Carolina Mendoza (IPICyT), foto cortesía de Héctor Silva (IPICyT).

delante). El análisis cuantitativo de la información obtenida en el MET permite en algunos casos determinar la posición que ocupan los átomos en un cristal.

En muchos casos es deseable saber si nuestras partículas son cristales perfectos o tienen algún tipo de defectos internos. Para eso el MET es una herramienta magnífica. La Figura 9 muestra un par de imágenes de una partícula pentagonal (5 lados) en modo de campo claro y campo oscuro. Tanto en el campo claro, pero más evidentemente en el campo oscuro, podemos ver que hay 5 líneas radiales que salen del centro de la partícula (flechas) espaciados un mismo número de grados (72 grados, para ser exactos). Esto indica que la partícula no es un monocristal, sino que está constituido por

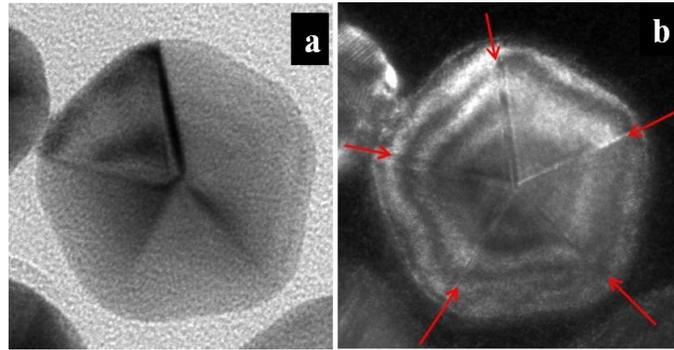


Figura 9: Imágenes de campo claro (a) y campo oscuro (b) de una partícula de oro. Muestras y fotos cortesía de Ernestina Castro (CICESE), Katrin Quester (CNyN-UNAM) y Miguel Avalos (IPICyT).

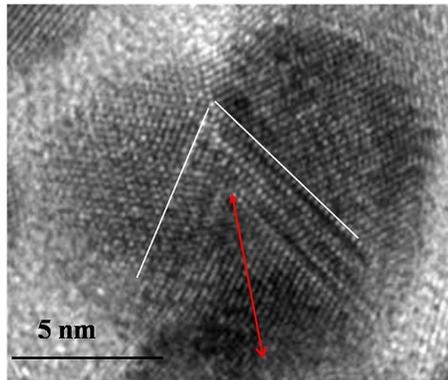


Figura 10: Imagen de microscopía de alta resolución (HRTEM) de una partícula de oro, mostrando el defecto conocido como macla.

5 unidades. Las líneas negras y blancas concéntricas (Figura 9b) marcan las zonas que tienen el mismo espesor, por lo que no es difícil imaginarnos que la partícula está constituida por 5 “cuñas” y que el espesor de la partícula es máximo en el centro de la misma, esto es, externamente es un decaedro, o sea, un objeto de 10 caras idénticas, que tiene 5 planos de imperfecciones llamados “maclas”.

Si se hacen imágenes de mayor amplificación, se puede verificar, a nivel atómico como se ven esos defectos. Según la teoría, este defecto se puede explicar suponiendo que hay un plano espejo (indicado por la flecha roja en la Figura 10) a través del cual se “reflejan” los planos cristalinos de la partícula, como se nota con la ayuda de las líneas blancas en la Figura 10.

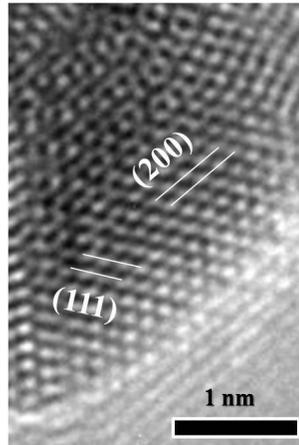


Figura 11: Átomos y planos atómicos (200) y (111) de una partícula de oro. Muestras y fotos cortesía de Ernestina Castro (CICESE), Katrin Quester (CNyN-UNAM) y Miguel Avalos (IPICyT).

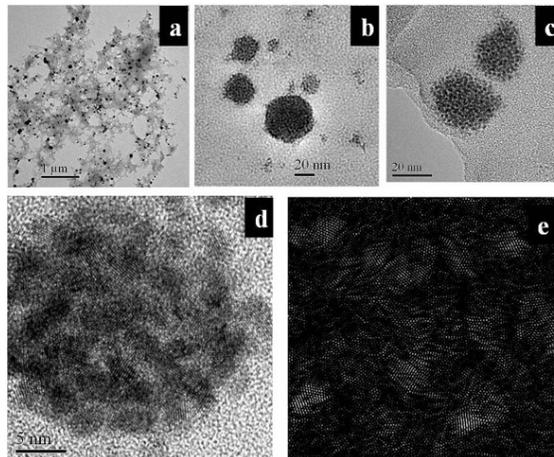


Figura 12: Aglomerados compuestos de nanopartículas de platino; a-d) vistas con amplificaciones cada vez mayores; e) misma imagen que d) procesada en espacio recíproco para resaltar los planos cristalinos. Muestras y fotos cortesía de Ernestina Castro (CICESE), Katrin Quester (CNyN-UNAM) y Miguel Avalos (IPICyT).

Adicionalmente, en esta imagen, cada uno de los puntos blancos representa un átomo, o más estrictamente hablando, una pequeña columna de átomos de los cuales sólo se ve al más externo. Esto se conoce en esta área de la técnica como una imagen de microscopía de alta resolución (HRTEM por

sus siglas en inglés de High Resolution Transmission Electron Microscopy)

La Figura 11 muestra de manera más clara los átomos y los planos atómicos (200) y (111) (notación de Miller) de una partícula de oro. Se puede notar también, que la partícula tiene un acomodo perfecto de los átomos en la orilla y va siendo menos perfecta hacia el centro de la misma, como se ve en la parte superior de la imagen.

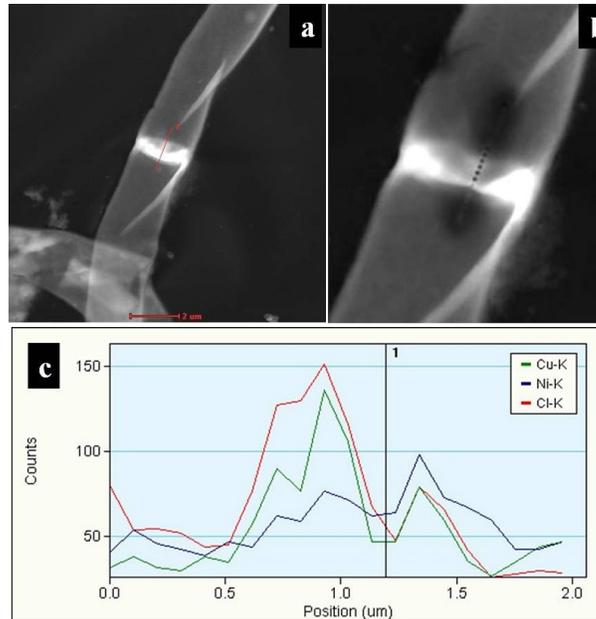


Figura 13: a) Hifa de *Neurospora crassa* marcando la línea sobre la cual se hará el análisis químico. b) hifa mostrando la marca del haz de electrones después del análisis. c) variación de la concentración del cobre, níquel y cloro a través de la línea de análisis. Muestras y fotos cortesía de Ernestina Castro (CICESE), Katrin Quester (CNyN-UNAM) y Miguel Avalos (IPICyT).

La importancia de conocer la naturaleza hasta el mínimo detalle se ilustra en la Figura 12. En este caso tenemos una serie de imágenes de ampliación creciente (a-d) de unas partículas de platino producidas utilizando para ello el hongo *Neurospora crassa*. A baja ampliación (a), parecería que las partículas son monocristales cuasi esféricos, pero al ir incrementando la ampliación (c y d) notamos que dichas partículas están compuestas de muchas otras partículas perfectas, o sea es un aglomerado de partículas perfectas. La imagen (d) puede “limpiarse” utilizando para ello procesado en el espacio recíproco (espacio de Fourier), de manera que se resalten las

características atómicas como se muestra en la imagen (e). Si la observación se hubiera hecho solamente a baja amplificación podríamos haber llegado a la conclusión errónea de que las partículas de platino eran cuasi esféricas y monocristalinas, cuando en realidad son policristalinas.

Como en el caso del MEB, además de la morfología de las muestras podemos también hacer análisis químico de las mismas. Con la ventaja adicional en el MET de que el área de análisis puede ser muy pequeña. La Figura 13 muestra el caso de análisis químico de zonas de aproximadamente 50 nm en una hifa de hongo (*Neurospora crassa*). En la Figura 13a se muestra con una línea en rojo la trayectoria que seguirá el análisis; la Figura 13b muestra la huella que dejó el haz de electrones sobre la muestra, y la Figura 13c muestra la variación de la composición de cobre, níquel y cloro a través de la línea de análisis, o sea, la traza química.

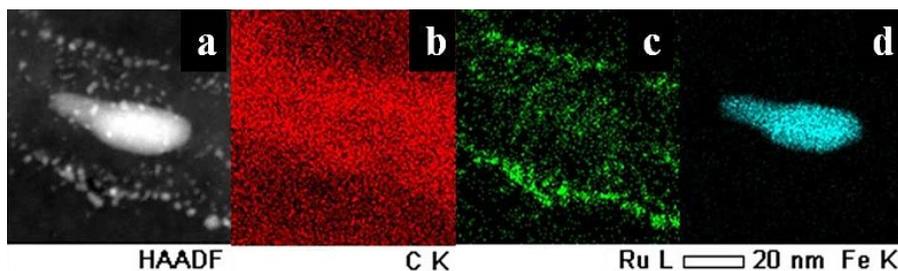


Figura 14: Nanotubo de carbón con hierro y rutenio. a) imagen en campo oscuro, b) mapa del carbón, c) mapa del rutenio, d) mapa del hierro.

También podemos saber en MET, como en el caso del MEB, la distribución de los elementos de interés en el espacio a analizar, esto es, podemos construir mapas químicos. La Figura 14a muestra una imagen de campo oscuro de un nanotubo de carbón con una partícula grande al centro y otras partículas chicas distribuidas por todo el nanotubo. Las figuras restantes muestran el mapa o distribución del carbono, rutenio e hierro, respectivamente. En base a esto, podemos entonces concluir que el hierro se encuentra localizado únicamente en la partícula grande central y que las partículas pequeñas son de rutenio posiblemente decorando el nanotubo de manera externa. El carbono aparece, como sería de esperarse a todo lo largo y ancho del nanotubo.

Podemos decir, a manera de resumen, que los adelantos tecnológicos nos han llevado a descubrir cada vez más la naturaleza que nos rodea, pasando de las primeras observaciones del ojo humano a observaciones cada

vez más detalladas de nuestro mundo. De tal manera, ahora podemos saber lo que hay dentro de los objetos de interés y también diseñar objetos átomo por átomo. Hemos pasado de observar el mundo al natural, a conocer el micro-mundo y hoy en día también el nano-mundo, con la invaluable ayuda de los microscopios electrónicos.

AGRADECIMIENTOS

A Gladis Labrada, Carolina Olguín, Luis Flores, Juan Manuel Quintana, Edgar Peralta, Ana Iris Peña, Araceli Patrón, Martha Santoyo, Lina Riego, Ernestina Castro, Katrin Quester, Alfredo R. Vilchis y Braulio Gutiérrez, por la ayuda técnica para este trabajo. También al LINAN por permitir el uso del laboratorio de microscopía, y al CONACyT por financiamiento a través del proyecto FC-2015-2-947.

BIBLIOGRAFÍA

Hoole S. *The Select Works of Antony Van Leeuwenhoek: Containing His Microscopical Discoveries in Many of the Works of Nature*. Volume 1, Wentworth Press, (2016).

Castro-Longoria E., Moreno-Velásquez S.D., Vilchis-Nestor A.R., Arenas-Berumen E. y Avalos-Borja M. *Production of platinum nanoparticles and nanoaggregates by using Neurospora crassa*, J. of Microbiology and Biotechnology 22(7) 1000-1004 (2012).

Flores-Sánchez L.A., Quintana-Melgoza J.M., Olivas A., Avalos-Borja M. *Reduction of nitric oxide by carbon monoxide over NiO, CuO, and ZnO catalysts*, Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis, 114(2) 597-609 (2015).

Olguín Jacobson C. *Revisión de la familia phylloporidae (holothuroidea: dendrochirotida) de las aguas mexicanas*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM (2014).

Goldstein J., Newbury D.E., Michael J.R, Ritchie N.W.M., Scott J.H.J. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Springer Science+Business Media LLC (2018).

Williams D.B. y Carter C.B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*, Plenum Pub. Corp. (1996).

LA FÍSICA EXPERIMENTAL EN BIOLOGÍA

*Rafael Ángel Barrio Paredes**

INTRODUCCIÓN

LA Física a finales del siglo XX se ha extendido a otros campos de la Ciencia, en particular la Biología. En el "March Meeting" de la American Physical Society en 1998 el 67 % de los trabajos presentados estuvieron relacionados con sistemas biológicos. Esto no había ocurrido antes debido a que los procesos físicos en los organismos vivos son considerados como los más complejos niveles de organización de muchos cuerpos a nivel atómico o molecular, donde las interacciones elementales (nucleares o electromagnéticas), que ciertamente suceden en estos sistemas, se enmascaran en una serie de comportamientos colectivos que producen propiedades emergentes, que son las importantes en la escala espacio-temporal de la maquinaria biológica.

Estudios teóricos en los que se describan procesos biológicos pueden considerarse, desde el punto de vista de la Física, como primitivos intentos que tratan de cubrir la brecha entre las interacciones fundamentales y el comportamiento del sistema, necesariamente haciendo uso de técnicas de campo medio o Física estadística en equilibrio. Así, la Biología molecular ha avanzado cada vez más, con ayuda de técnicas computacionales, en el estudio de macromoléculas orgánicas de importancia biológica. El descubrimiento de la estructura y funcionalidad del ADN en 1950 ha revolucionado nuestras ideas acerca de los mecanismos que dan origen a la vida. Por otra parte, la Biología, también ayudada por el avance en computación, ha visto el surgimiento de nuevas perspectivas y métodos en el estudio de los procesos fundamentales de la vida. El surgimiento de nuevos grupos de investigación en Biología Matemática ha sido importante en el desarrollo de

*Departamento de Sistemas Complejos, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

nuevos tratamientos teóricos de los fenómenos biológicos.

Sin embargo, es indudable que los más importantes avances en biología se han dado recientemente en los trabajos experimentales. La aplicación de los principios de la Física experimental a los procesos biológicos ha resultado en un cambio radical en la forma como se trata el estudio de éstos. Éste es precisamente el tema de este escrito, aunque se comprenderá que por su amplitud, sólo abordaremos parcialmente.

Casi cualquier experimento puede representarse con el diagrama de la Figura 1. Sobre el sistema interactúa un agente externo, que llamaremos la fuente. Esta fuente emite cualquier cosa, como radiación electromagnética, fuerzas impulsivas, gradientes de temperatura, haces de partículas, proyectiles, agentes químicos, o lo que se quiera imaginar. Cuando el sistema siente la perturbación debida a esta interacción, responde de una cierta manera. El objetivo de la medición es obtener alguna cantidad que permita cuantificar la respuesta del sistema ante este estímulo.

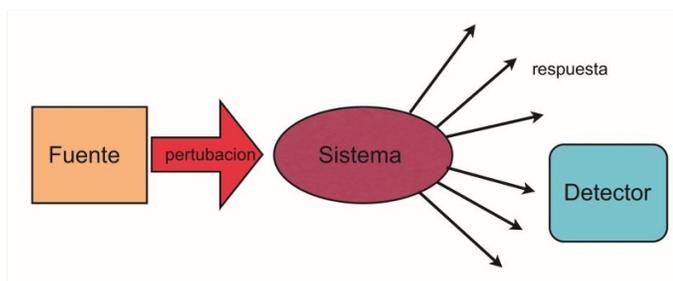


Figura 1: Esquema representando el acto de medir.

Examinemos con más cuidado el acto de medir. Es evidente que, en general, el sistema no está preparado para el acto de medición. Lo que sucede en general es que la perturbación produce que el estado físico del sistema cambie. Matemáticamente podemos representar lo que hemos dicho con símbolos. Suponga que el aparato u , llamado en matemáticas operador, que causa la perturbación es denotado por \hat{S} y que se aplica al sistema, cuyo estado está representado por \bar{v} . Entonces escribimos

$$\hat{S}\bar{v} = \bar{v}', \quad (1)$$

donde el lado derecho de la ecuación quiere decir que el estado del sistema ha cambiado a otro, representado por \bar{v}' . Esto no es lo deseable si uno quiere medir, ya que lo que se pretende es dejar al sistema lo menos perturbado

posible y extraer un número, que es la definición de una medición. En este caso se debe cumplir que

$$\hat{S}\bar{v} = w\bar{v}, \quad (2)$$

donde w es un número que representa el resultado de la medición y el sistema no ha cambiado de estado. La ecuación 2 se conoce como la ecuación de eigenvalores¹. En efecto, el sistema se debe encontrar al inicio en un estado apropiado para medir. Entonces, para efectuar un experimento uno tiene que empezar por escoger la fuente requerida, saber cómo funciona y cómo se puede controlar, después uno necesita preparar al sistema de forma que al interactuar con la fuente su estado macroscópico no cambie ante la perturbación, al menos en las cantidades físicas que nos interesen, representadas por la colección de cantidades, o variables, que caracterizan el estado del sistema y están contenidas en el vector \bar{v} .

En las secciones siguientes daré algunos ejemplos significativos de este proceso en experimentos con sistemas biológicos, tratando de enfatizar los conceptos que se derivan de la Física y que han permitido desarrollar nuevas técnicas experimentales en la Biología.

He escogido, de entre la multitud de técnicas, las que tienen que ver con tres ramas importantes de la Física: 1) La Teoría Cuántica de los Sólidos, 2) La Teoría Electromagnética y 3) La Física No-lineal. Obviamente esta selección es completamente arbitraria y obedece sólo al hecho de mi proximidad individual con ciertas técnicas.

FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO

La Física del Estado Sólido es poco más que la Mecánica Cuántica aplicada a sistemas con simetría traslacional, como los sólidos cristalinos, en los cuales los átomos se encuentran oscilando alrededor de sus posiciones de equilibrio, que están dispuestas en puntos que se repiten en el espacio, de forma que da lo mismo señalar cualquier átomo porque el entorno es el mismo para todos.

En mecánica cuántica, la ecuación fundamental es un caso particular de la ecuación 2, en donde el operador \hat{S} es el Hamiltoniano, que representa la energía total del sistema, es decir, la suma de la energía cinética o de movimiento y la energía potencial debida a un campo externo. En general la

¹del alemán eigen, propio o apropiado. Esta es la ecuación más importante de la Física y no podemos omitirla, ya que lo que define a esta ciencia es el poder describir lo que se espera de una medida experimental.

energía total depende tanto de las coordenadas espaciales como del tiempo, pero si el sistema está preparado apropiadamente para la medición, la energía se conserva y el estado cuántico no cambia en el tiempo. Entonces podemos usar la ecuación 2, conocida en este caso como la ecuación de Schrödinger, donde los eigenvalores serían los valores esperados de la energía del sistema.

En un sistema macroscópico siempre podemos hacer que la interacción entre el aparato de medición y el sistema sea tan pequeña que la podamos despreciar. Esto no es necesariamente correcto cuando el tamaño del sistema se reduce a nivel atómico. La hipótesis cuántica introduce el concepto de la mínima acción, que significa que no es posible medir interactuando con el sistema tan poco como se quiera, y además sugiere que la interacción mínima posible es la constante de Planck ($h = 2\pi\hbar$), que tiene unidades de energía por tiempo, o unidades de acción. Una de las consecuencias inmediatas de la hipótesis cuántica es que los valores posibles de la energía son muy específicos.

En particular, los electrones en el campo de un átomo o molécula, tienen energías que toman valores muy precisos, conocidos como niveles cuánticos. El problema es que la ecuación de Schrödinger sólo se puede resolver para casos muy especiales, que involucran una o dos partículas, aunque existen técnicas, como la teoría de perturbaciones, que permiten extender el ámbito de los problemas solubles.

La simetría traslacional de los cristales permite resolver el problema cuántico de los electrones en un campo cristalino periódico, hecho que significa que la energía potencial V es periódica. La periodicidad en los cristales significa que las posiciones de equilibrio de los átomos se repiten en el espacio cada que se viaja en una dirección dada, digamos x una distancia fija a . Podemos escribir la condición de periodicidad como $V(x) = V(x+na)$, donde n es un número entero y a es la longitud que mide la periodicidad (o parámetro de la red cristalina).

En este caso, si se hace una transformada de Fourier de la ecuación 2, es decir, las variables espaciales $\vec{r} = (x, y, z)$ se reemplazan por $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ ², el problema de los electrones en el sólido queda reducido a estudiar a un sólo electrón en este espacio. La condición de periodicidad exige que la solución del problema tenga la misma periodicidad que la red cristalina, lo que se conoce como el Teorema de Bloch.

Una situación especial es cuando el potencial es nulo ($V = 0$) y se tiene un electrón libre, cuya velocidad está dada por $\vec{v} = \hbar\vec{k}/m_e$, donde m_e es

²que definen el "espacio recíproco", ya que k tiene unidades de recíproco de distancia.

la masa del electrón. Es evidente que en este caso, la energía cinética del electrón es simplemente la parábola $E(k) = m_e v^2 / 2 = \hbar^2 k^2 / (2m_e)$. La solución será simplemente una onda plana, definida por una frecuencia ν y una longitud de onda λ , tales que su producto es la velocidad de la onda. La magnitud de k es simplemente $|k| = 2\pi/\lambda$.³

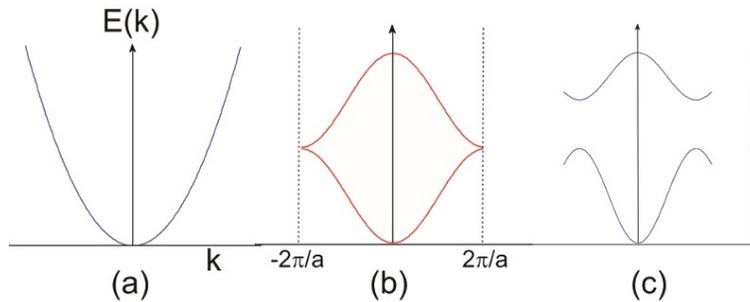


Figura 2: (a) relación de dispersión ($E(k)$) para un electrón libre. (b) Relación de dispersión para un electrón en un potencial periódico en una dimensión. La parábola se ha convertido en un coseno, que se representa sólo en la región $k \in (-2\pi/a, 2\pi/a)$ (primera zona de Brillouin). (c) Bandas en un sólido, en el que la masa efectiva de la cuasipartícula es diferente para cada banda. Los estados permitidos están en los niveles marcados con verde, y la banda prohibida, o brecha de energía, se indica en rojo.

En la Figura 2(a) mostramos la relación de dispersión ($E(k)$) para un electrón libre y en (b) la modificación al poner un potencial periódico en una dimensión. En (c) mostramos una relación de dispersión típica en un sólido, donde encontramos energías permitidas, o bandas, y energías prohibidas, o brechas.

Para entender el origen de las bandas electrónicas tenemos que considerar que los electrones en un sólido están ligados en general a los iones y sienten el potencial atómico. Sabemos que cada electrón en un átomo puede ocupar sólo ciertos niveles de energía⁴ y si tuviéramos todos los átomos en un sólido separados por distancias muy grandes, los niveles de energía de todos los electrones serían los mismos, es decir, estarían degenerados.

Al aproximar los iones a distancias comparables a sus tamaños, es decir

³Esto es equivalente a considerar a los electrones dentro de un sólido como un “gas ideal” y se conoce como el modelo de Sommerfeld.

⁴Como resultado de resolver la ecuación de Schrödinger con un campo central como potencial: $V(r) \sim 1/r$, es decir que la energía de interacción depende como el inverso de la distancia.

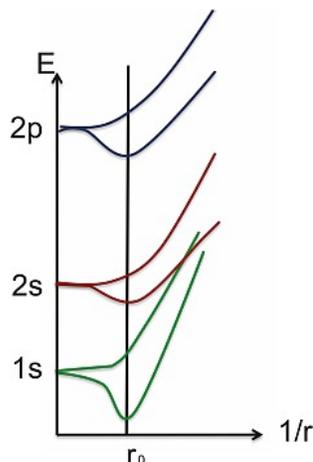


Figura 3: Separación de los niveles atómicos de dos átomos como función del inverso de la distancia entre ellos. Observe que existe un estado ligado (“bonding”) con un mínimo en una distancia r_0 y un estado no ligado (“antibonding”) de mayor energía para cada nivel atómico. El origen del mínimo es debido a que uno no puede aproximar dos iones a distancias muy pequeñas, porque entonces la repulsión nuclear se siente y eleva la energía. En un sólido existen muchos átomos, de forma que las regiones entre los estados bonding y antibonding (entre líneas del mismo color) forman un continuo de energías permitidas. Éste es el origen de las bandas electrónicas en sólidos.

a unos cuantos Amstrongs ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{cm}$), los niveles atómicos se modifican, y en vez de tener dos estados energéticos idénticos E_n tendríamos un estado en $E_n + V_{12}$ y otro en $E_n - V_{12}$, donde V_{12} es la energía de interacción entre las dos partículas cercanas. Entonces la degeneración se remueve. Esto se conoce como repulsión de niveles. La dependencia de esta repulsión como función del inverso de la distancia interatómica se ilustra en la Figura 3.

SEMICONDUCTORES Y COMPUTACIÓN

Ahora estamos en posición de poder definir un semiconductor. Observamos que los electrones en un sólido no se comportan como electrones libres, sino que son cuasipartículas, que se mueven con una inercia diferente a su masa conocida como la masa efectiva. En efecto, un electrón libre tiene una masa fija por m_e , mientras que en el sólido la masa se modifica y adquiere un valor efectivo m_{ef} que depende de la relación de dispersión,

que en un sólido es más complicada. Como consecuencia de esto, las bandas permitidas en el sólido pueden traslaparse o no, dejando una brecha de energías prohibidas, como se ilustra en la Figura 3.

Recordemos que los electrones son partículas de Fermi, lo cual quiere decir que obedecen el principio de exclusión de Pauli y no puede haber más que un electrón ocupando un estado cuántico dado. Entonces, a temperatura cero, los estados cuánticos de menor energía se ocupan preferentemente, de forma que si se tienen N electrones en el sólido, los N estados con menor energía estarán ocupados y el resto a energías más altas estarán vacíos. El valor de la energía que separa los estados ocupados de los vacíos en el cero absoluto de temperatura se conoce como el “nivel de Fermi”.

Si el nivel de Fermi del sólido cae en medio de una banda permitida, los electrones se podrán excitar con cantidades ínfimas de energía, pudiendo cambiar su estado k (y por lo tanto su velocidad) casi libremente. En este caso el sólido es un metal. Por el contrario, si el nivel de Fermi cae en medio de una brecha prohibida, no puede excitarse, al menos que se le conceda la cantidad de energía suficiente para librar la brecha y encontrar un estado desocupado accesible. El resultado es que el material no conduce electricidad si el voltaje es menor que el requerido para librar la brecha, y es conductor para voltajes mayores. Esto es lo que se conoce como un material semiconductor. En general las brechas prohibidas de los semiconductores están alrededor de un electrón-volt ($1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}$ Joules). Los materiales con brechas mayores, de varios eV, se consideran materiales aislantes.

Este hecho, aparentemente simple, ha permitido el desarrollo de la electrónica y la computación de forma vertiginosa a finales del siglo pasado, y aún hoy en día, debido a que se pueden construir compuertas electrónicas y transistores.

El material que se usa casi universalmente en todos los dispositivos semiconductores es el Silicio, elemento de la columna IV de la tabla periódica. Cristaliza en la estructura del diamante, que puede verse como dos redes cúbicas centradas en las caras, desplazadas $1/4$ del parámetro de la red en la dirección diagonal del cubo (1,1,1). El resultado es que cada átomo tiene 4 vecinos dispuestos en los vértices de un tetraedro regular. A este elemento debemos el surgimiento de la “era de la información” que estamos viviendo actualmente.

Sería absurdo tratar de cubrir todas las aplicaciones de los semiconductores en este espacio tan reducido. Nos bastará con describir una técnica experimental nueva basada en los sensores de silicio.

SENSORES DE SILICIO EN ELECTROFISIOLOGÍA

Unos de los principales retos actuales en neurociencias es estudiar el comportamiento colectivo de grandes grupos de neuronas. Al entender las relaciones entre las entradas y salidas de los circuitos neuronales por medio de grabaciones electrofisiológicas con alta resolución espacio-temporal, uno puede asociar los cambios en actividad neuronal con patrones de conducta de animales con cerebros pequeños o grandes, incluyendo los humanos.

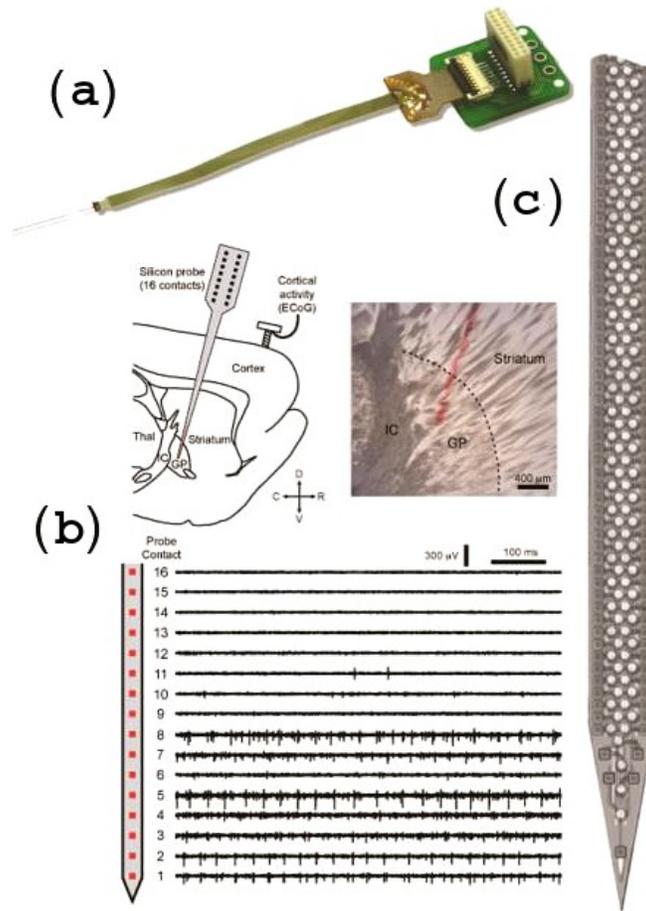


Figura 4: (a) Fotografía de un sensor comercial de silicio para registro electrofisiológico. (b) Ejemplo de registros independientes en diversas zonas del cerebro de una rata. (c) detalle de una prueba de silicio con 1000 electrodos independientes.

La técnica usada actualmente para estos estudios es la electrofisiología

con dispositivos de silicio que pueden ser miniaturizados al grado de poder registrar potenciales locales en una sola neurona. Estos sensores de silicio son capaces de registrar corrientes muy pequeñas con una resolución espacial enorme, de forma que si se implanta un dispositivo con muchos sensores de silicio, uno puede obtener muchos registros simultáneos en una región específica del cerebro, y así encontrar correlaciones espacio-temporales en el funcionamiento de las neuronas.

En la Figura 4(a) mostramos una prueba de silicio comercial con 64 electrodos. Un ejemplo de los registros tomados en capas profundas del cerebro de una rata se muestra en la Figura 4(b) (adaptada de la página del grupo del Dr. Magill del Medical Research Centre, Oxford). Actualmente se pueden construir dispositivos de hasta 1000 electrodos, como el mostrado en la Figura 4(c), y se pueden implantar no sólo en animales anestesiados fijos, sino en animales libres y conscientes. Estos estudios están revelando nuevas rutas del funcionamiento real del cerebro.

COMPUTACIÓN

Es indudable que el desarrollo que los semiconductores ha propiciado en el campo de la computación y la informática ha sido vertiginoso, y no sólo en el ámbito del “hardware”, sino en el desarrollo de “software” específico para experimentos clave.

Como ejemplo del “hardware” podríamos mencionar el hecho de que cuando el genoma humano fue presentado completamente por primera vez ocupaba un espacio 3300 libros de mil páginas cada uno con mil pares de bases por página. Gracias a los dispositivos de registro de memoria, esta información cabe actualmente en un CD, o en un USB barato. Aunque todavía estamos lejos de inventar un método para guardar datos eficientemente, para tener una perspectiva real pensemos en que esta información cabe en la realidad en el núcleo de una célula.

Como ejemplo de “software” he escogido el uso de un programa nuevo de computación (Neurolucida) que permite la integración tridimensional de los caminos de comunicación y conexiones neuronales detectados con técnicas muy precisas, que se basan en el uso combinado de microscopía electrónica y microscopía confocal, usando inmunohistoquímica. La Figura 5 muestra las vías de la innervación de arginina vasopresina (AVP) en el hipocampo del cerebro de una rata. Este neuropéptido juega un papel importante en regular la excitabilidad de las neuronas a través de los receptores de vasopresina.

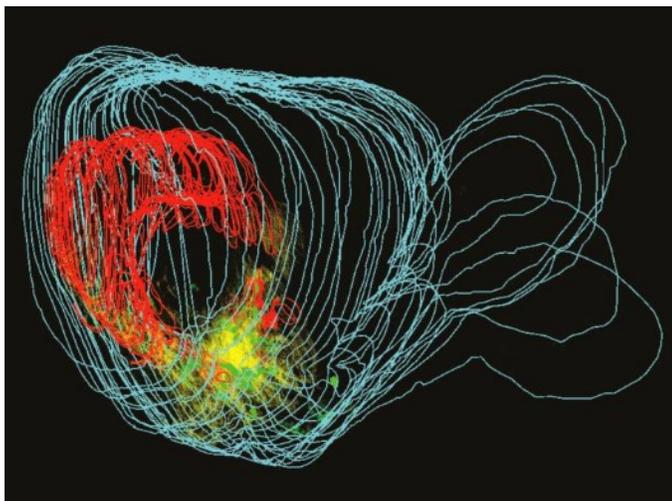


Figura 5: Reconstrucción tri-dimensional de las innervaciones intracerebrales del sistema vasopresinérgico de una rata, a partir de 78 cortes histológicos seriados usando NeuroLucida. Los trazos azules delimitan el contorno del cerebro de la rata (el cerebelo y el tallo cerebral fueron omitidos por claridad). Los trazos rojos delimitan el contorno del hipocampo, región crucial para la memoria y aprendizaje. Los trazos amarillos indican los axones vasopresinérgicos. Finalmente, los puntos verdes indican cuerpos neuronales que contienen esta neuro-hormona. (Cortesía de la Dra. Limei Zhang, Facultad de Medicina, UNAM)

NeuroLucida es un sistema computarizado, inventado por el Dr. Edmund Glaser y su colega Dr. Hendrick Van der Loos y comercializado por MBF Bioscience, para ayudar a los científicos a reconstruir tridimensionalmente imágenes neuronales. El sistema acopla una computadora con un software apropiado a un microscopio óptico motorizado. Mientras el investigador marca en el monitor la señal que desea sobre una imagen digitalizada, el sistema digitaliza las coordenadas (X, Y, Z). Posteriormente se integran todos los datos para reconstruir un objeto tri-dimensional. Este sistema permite obtener una visualización global del objeto en estudio (las proyecciones intracerebrales de vasopresina, en nuestro ejemplo) permitiendo rotación y por lo tanto visualización en diferentes perspectivas.

EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

El estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos se hizo por separado y poco a poco, como resultado de los trabajos de Faraday y Ampère en

la primera mitad del siglo XIX, los físicos se dieron cuenta que ambos fenómenos estaban íntimamente relacionados. J.C. Maxwell propuso un grupo de ecuaciones que interrelacionan el campo eléctrico E , cuyas fuentes son las cargas eléctricas, con el campo magnético B , cuyas fuentes son las corrientes, o sea las cargas en movimiento. Se habla de un campo de fuerzas cuando a cada punto del espacio-tiempo se le puede asociar un vector. Un campo vectorial cualquiera está únicamente determinado si se conocen sus variaciones espaciales, tanto su divergencia como su rotacional, así que las ecuaciones de Maxwell no son sino expresiones para las variaciones o derivadas de los campos E y B .

Una de las genialidades de Maxwell fue demostrar que, en ausencia de fuentes, el campo electromagnético obedece la "ecuación de onda". Esta ecuación establece que la relación entre las segundas variaciones espaciales y las temporales del campo son proporcionales, con una constante de proporcionalidad que es el inverso del cuadrado de la velocidad de la luz. La solución de esta ecuación define un movimiento ondulatorio que se propaga en el espacio a la velocidad de la luz.

Es maravilloso constatar que la ecuación dinámica del campo electromagnético es exactamente la misma que rige la propagación de ondas en un medio. Esto lo expresa Faraday con maravillosa claridad (En las observaciones depositadas en la Royal Society del 12 de Marzo de 1832)⁵.

I am inclined to compare the diffusion of magnetic forces from a magnetic to the vibrations upon the surface of disturbed water, or those of air in the phenomenon of sound, i.e., I am inclined to think the vibratory theory will apply to these phenomena as it does to sound, and most probably light⁶.

Esta frase, profética en su tiempo, no hace más que enfatizar la universalidad de la Teoría Clásica de las Vibraciones.

Entonces la luz puede considerarse como una onda. La antigua discordia entre la teoría corpuscular de la luz, donde se definen los fotones como partículas y la teoría ondulatoria de Huygens se encuentran de nuevo en la electrodinámica de Maxwell, donde la radiación electromagnética se

⁵Me inclino a comparar la difusión de fuerzas magnéticas de un polo magnético a las vibraciones sobre la superficie de agua perturbada, o con aquéllas del aire en el fenómeno del sonido, es decir, me inclino a pensar que la teoría de las vibraciones se aplicará a estos fenómenos como al sonido, y con toda probabilidad la luz.

⁶M. Faraday. *Experimental researches in electricity*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, (1832).

propaga en forma de ondas sin que exista un medio que se distorba, pero recordemos que tanto una onda como una partícula son conceptos abstractos que sólo existen en la mente humana, así que no existe discordia. Toda la óptica geométrica se puede entender usando ondas electromagnéticas o fotones como elementos esenciales para describir la luz, dependiendo del fenómeno a estudiar.

Un rasgo notorio de las ecuaciones de Maxwell es que son invariantes ante transformaciones de Lorentz, que nos dicen cómo se ve un mismo fenómeno físico en diferentes marcos de referencia. Esto es muy importante, ya que Einstein mostró que toda teoría en la Física tiene forzosamente que obedecer los principios de la Teoría de la Relatividad. Curiosamente, ante la disyuntiva de contradecir a Newton o a Maxwell, Einstein optó por lo primero.

Mencionemos que las ecuaciones de Maxwell no cambian si al potencial eléctrico se le agrega una función con gradiente nulo, y al potencial vectorial magnético se le agrega el gradiente de una función arbitraria. Esta propiedad se conoce como la simetría de invariancia de norma. Cuando se tiene un sistema en el que se rompe la invariancia de norma se dice que el sistema es un superconductor, el cual presenta cero resistencia al paso de la corriente y es un diamagneto perfecto, es decir que el campo magnético es cero dentro del sistema.

En la mayoría de los sistemas físicos se tiene cuidado de no sujetarlos a campos excesivamente grandes. En este caso, tal como ya sabemos, la respuesta del sistema ante la perturbación del campo es lineal, es decir la respuesta es proporcional a la perturbación, y la constante de proporcionalidad se conoce como la "susceptibilidad" del sistema. Tomemos, por ejemplo, la famosa "Ley de Ohm", que dice que el "voltaje" es proporcional a la corriente j que se obtiene, y esa constante se llama la resistencia eléctrica. El inverso de la resistencia por unidad de área es una propiedad del sistema físico y se conoce como la conductividad eléctrica σ del material. Entonces la corriente es proporcional al campo eléctrico aplicado E y uno puede escribir $\langle j \rangle = \overleftrightarrow{\sigma} E$, donde en general la conductividad es un tensor. En el caso de que la conductividad sea constante, esta relación es la Ley de Ohm. De hecho los campos dentro de un material se definen a través del vector desplazamiento $D \equiv \epsilon E$, donde ϵ es la función dieléctrica, que está relacionada con varias cantidades medibles, tales como la polarizabilidad (α), la conductividad ac con frecuencia (ν), o el índice de refracción (n). La relación entre estas cantidades es $\epsilon = 1 + 4\pi\alpha = 1 - 2i\sigma/\nu = n^2$. Todas estas cantidades son susceptibilidades generalizadas. En el caso del campo

magnético, la magnetización es proporcional a éste y la constante se llama susceptibilidad magnética.

Las aplicaciones de esta teoría básica son innumerables, y es difícil encontrar un experimento donde no se haga uso de los fenómenos electromagnéticos, desde una simple lámpara incandescente, o una luz LED, hasta juntas Josephson y los más sofisticados dispositivos electrónicos. Aquí sólo daré unos ejemplos de técnicas ubicuas en la biología actual.

FIJACIÓN DE MEMBRANAS

La electrofisiología se basa en la aplicación de la Ley de Ohm para investigar las corrientes eléctricas en el tejido nervioso. Con el uso de amplificadores diferenciales se puede establecer el nivel cero de corriente. Esto permite mantener un voltaje constante mientras se observan los cambios en la corriente. Alternativamente, se puede mantener la corriente en la célula constante mientras se observan cambios en el potencial eléctrico de la membrana.

Uno de los retos en el estudio de la actividad eléctrica de las neuronas ha sido el obtener registros en una sola neurona. La técnica tradicional consiste en introducir un micro electrodo en el interior de una célula, pinchando la membrana.

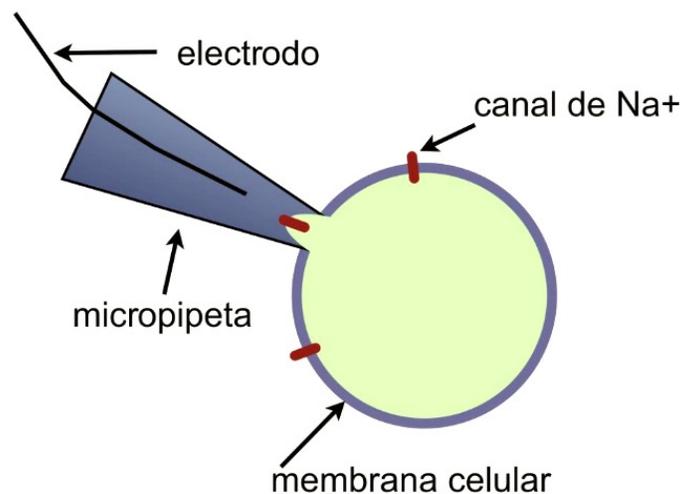


Figura 6: Esquema que ilustra la técnica de patch clamp para el registro de canales iónicos individuales.

Una nueva técnica electrofisiológica, llamada de fijación de membranas o “patch clamp”, que no sólo permite registros unicelulares, sino que evita ruido y señales colaterales en la técnica tradicional, fue desarrollada por Erwin Neher and Bert Sakmann (quienes recibieron el Premio Nobel en Fisiología y Medicina en 1991 por este trabajo). Esta técnica permite el estudio individual (o múltiple) de canales iónicos en células. Puede ser aplicado a una gran variedad de células, pero se usa especialmente en el estudio de células excitables como las neuronas, los miocitos cardiacos, las fibras musculares y las células beta del páncreas. También se puede aplicar al estudio de canales iónicos en bacterias.

Con este procedimiento se registraron las corrientes a través de un sólo canal iónico por primera vez, demostrando su participación en procesos fundamentales de la célula, como la dinámica del potencial de acción. La técnica se ilustra en la Figura 6.

El electrodo se introduce en una micropipeta de vidrio que tiene una punta abierta de cerca de una micra de diámetro (esta área contiene uno o pocos canales iónicos moleculares). La punta de la micropipeta se calienta para producir una superficie suave que ayude a formar un sello de alta resistencia (más de 10^9 Ohms), el cual se logra succionando el líquido en el interior de la pipeta, que actúa como electrolito, y por lo tanto corresponde a la composición iónica de la solución del baño. Para producir la corriente eléctrica se usa un alambre de plata en contacto con esta solución y se envía a un amplificador diferencial. Para estudiar los canales iónicos bajo diferentes condiciones se puede cambiar la composición de la solución o incluso agregar medicamentos.

FLUORESCENCIA

La interacción del campo electromagnético con las cargas presentes en la materia es fascinante. Los electrones ligados a los iones en estados cuánticos bien definidos, pueden ser excitados por medio de radiación electromagnética, ocupando niveles con mayor energía. Estos electrones eventualmente se relajan, ya sea en forma no-radiativa (interacción con las vibraciones de los átomos, por ejemplo), o en forma radiativa, emitiendo la energía sobrante como radiación electromagnética. Este es el origen del color de una substancia.

La Fluorescencia es la emisión de luz por una substancia que ha absorbido radiación electromagnética de otra frecuencia. En general, la intervención de los procesos no-radiativos hace que la luz emitida sea de frecuencia

más baja a la absorbida, lo que quiere decir que la luz emitida tiene menor energía. Sin embargo, en casos cuando la radiación absorbida es intensa, un electrón puede absorber dos fotones a la vez y emitir luz con mayor energía que la radiación absorbida. En el caso en que tanto la radiación absorbida como la emitida tengan la misma frecuencia, se dice que la fluorescencia es resonante.

Este fenómeno tiene múltiples aplicaciones prácticas en mineralogía, gemología, sensores químicos (espectroscopía fluorescente), detectores biológicos, tintes y por supuesto en lámparas fluorescentes.

La fluorescencia se usa en la biología frecuentemente, ya que es un modo no invasivo y no destructivo para detectar o analizar moléculas biológicas. Algunas proteínas en las células fluorescen en forma natural, lo que se conoce como fluorescencia intrínseca. Ejemplos de estas sustancias son el triptófano y la ficoeritrina, o proteína fluorescente verde.

En general uno usa un "fluoroforo", que es una sustancia con fluorescencia intrínseca, como una molécula pequeña, una proteína o un punto cuántico para etiquetar otras proteínas, ácidos nucleicos, lípidos u otras moléculas. Los fluoroforos se pueden usar como trazadores en líquidos, o como un tinte para mostrar ciertas estructuras a las que se adhieren. También pueden ser usados como indicadores de cambios en el medio ambiente, por ejemplo, cambios en la polaridad, concentración de iones, etc.

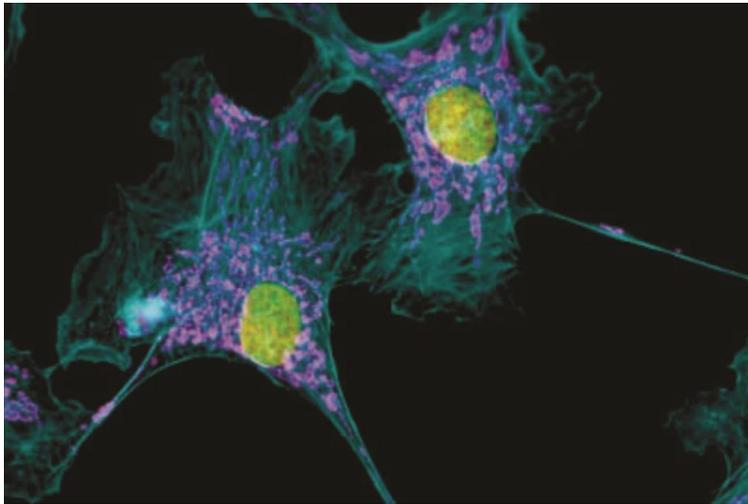


Figura 7: Imagen de células usando fluorescencia con tintes de diversos colores.

La fluorescencia es muy útil para obtener imágenes o hacer espectros-

copía. La sustancia más popular es la fluoriscina por su amina activa FITC (isotiocianato) y para etiquetar anticuerpos existe toda una nueva generación de fluoroforos que son mas fotoestables y menos sensibles a cambios en pH. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de una imagen obtenida con tintes fluorescentes.

MICROSCOPIA DE DOS FOTONES

La excitación de dos fotones se basa en la idea que dos fotones de energía menor que la que se necesita para poblar un nivel excitado también puede excitar a un fluoroforo en un evento cuántico. Esta técnica experimental se basa en los conceptos teóricos desarrollados por primera vez en una tesis doctoral y observada por primera vez en 1961 en cristales de $CaF_2 : Eu_2^+$ (Kaiser y Garrett, 1961) y en átomos aislados de vapor de cesio en 1962 (Abella, 1962).

Cada fotón lleva la mitad de la energía necesaria para excitar la molécula del fluoroforo, y el resultado es que la fluorescencia emitida tiene una energía mayor que la de cualquiera de los fotones usados. La probabilidad de absorber simultáneamente dos fotones es extremadamente pequeña, y por lo tanto se requiere un alto flujo de fotones excitatorios, como el que se produce en un láser de pulsos de femtosegundos.

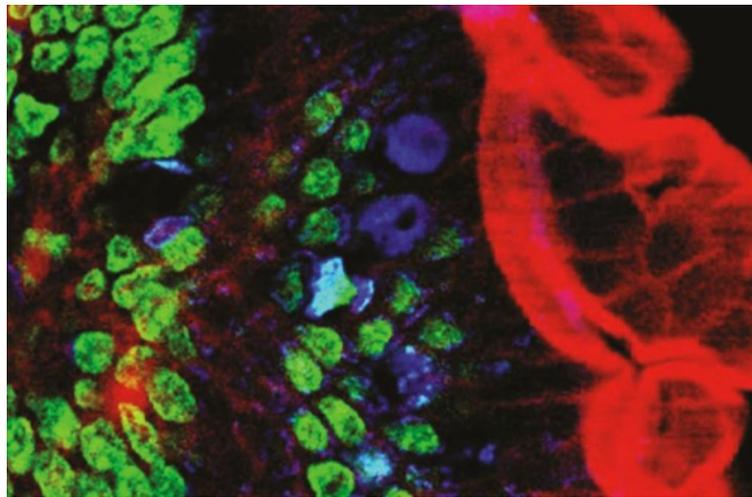


Figura 8: Microfotografía con excitación de dos fotones del intestino de ratón. rojo: Actina. Verde: núcleos celulares. azul: mucus de “goblet cells” (células caliciformes). Obtenida a 780 nm usando un laser de Ti-zafiro.

Los fluoroforos mas comunes tienen espectros de excitación con longitudes de onda en el visible, entre 400 a 500 nm (un nanómetro = $1\text{nm} = 10^{-9}$ metros), mientras que los láseres usados para excitar dos fotones emiten en longitudes de onda mas largas (en el infrarrojo), del orden de 700 – 1000 nm. Debido a que la probabilidad de excitación crece cuadráticamente con la intensidad de luz, la mayor parte de la fluorescencia está en las regiones donde se enfoca el láser (típicamente en un volumen de 1 femtolitro), lo que resulta en una alta definición de los objetos que se encuentren en foco, aumentando la definición de los mismos. Esta localización de la fluorescencia es la gran ventaja de la microscopía de dos fotones.

El uso de luz infrarroja para excitar fluoroforos tiene enormes beneficios. Por un lado, las longitudes de onda largas se dispersan menos que las cortas, lo que produce una mejor resolución de la imagen, y por otro lado los fotones con menor energía causan menor daño a los tejidos biológicos. En la Figura 8 se muestra una fotografía tomada con la técnica de dos fotones.

MICROSCOPIA CONFOCAL

Esta es una técnica usada para incrementar el contraste de ciertas estructuras y es muy valiosa en resaltar que se encuentran en un plano específico, especialmente en tejidos biológicos y en la inspección de control de calidad de semiconductores.

El principio de operación es muy simple y se muestra en el diagrama de la Figura 9: La luz emitida por la fuente en un microscopio normal se divide con un semi-espejo y la luz que produce la imagen es reflejada allí y enviada a través de un diafragma muy fino situado en el foco de la imagen al detector, que puede ser un fotomultiplicador. Los haces que provienen de regiones fuera del plano focal escogido no pueden pasar por el diafragma.

El concepto de imagen confocal fue patentado por Marvin Minsky en 1957 (Minsky, 1961) y puede ser usado para obtener imágenes tridimensionales barriendo con un láser la región observada cambiando el plano focal. También en la Figura 9 mostramos la fotografía del ápice del meristemo de la raíz de la planta *Arabidopsis thaliana* que hemos estudiado en nuestro grupo de trabajo (Barrio *et al.*, 2013).

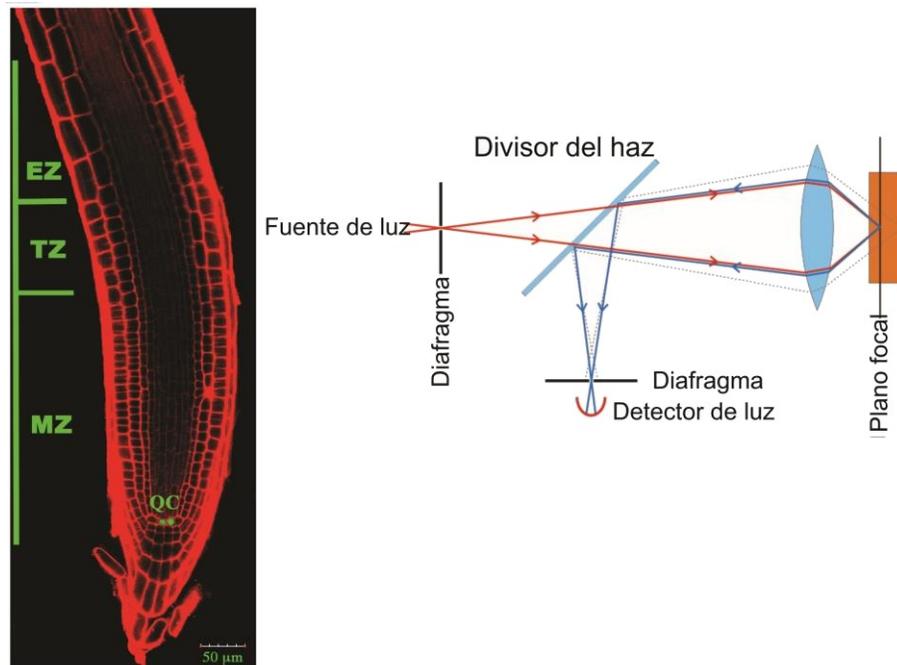


Figura 9: Microfotografía confocal del meristemo apical de la raíz de *Arabidopsis thaliana* y esquema que muestra el principio funcional de la microscopía confocal.

FÍSICA NO-LINEAL

Hasta ahora hemos descrito experimentos en que la perturbación al sistema es pequeña, de forma que la Ecuación 2 se puede cumplir. Es evidente que, particularmente en la biología esto no se cumple. Los sistemas biológicos están fuera de equilibrio termodinámico, casi por definición, y además los procesos dinámicos son altamente no-lineales. Prácticamente cualquier teoría o modelo en sistemas vivos tiene que plantearse como un proceso no-lineal, en el que la respuesta del sistema ante la perturbación (no necesariamente pequeña) no es proporcional a la intensidad de la misma. El panorama ha cambiado de forma drástica durante los últimos 50 años. La importancia en los fenómenos no lineales ha sido una de las áreas emergentes de la física, que entre otras cosas, ha permitido avances significativos en el entendimiento de los procesos en los seres vivos.

Una de las características universales más importantes de los sistemas no lineales es el fenómeno de ruptura espontánea de la simetría, lo que

se conoce como una bifurcación. En forma simple, una bifurcación ocurre cuando la acción del campo externo sobre el sistema es muy grande y el sistema responde de forma inesperada apartándose de la respuesta lineal.

Ilustremos con un ejemplo este concepto. Consideremos un péndulo invertido configurado por una masa m que está sujeta de un eje vertical mediante una varilla rígida a una cierta altura l . La masa puede deslizarse sobre la varilla y permanecer fija en cualquier punto sobre ésta, por ejemplo si la masa está imantada y la varilla es de hierro. De manera que la longitud del péndulo se puede variar a placer.

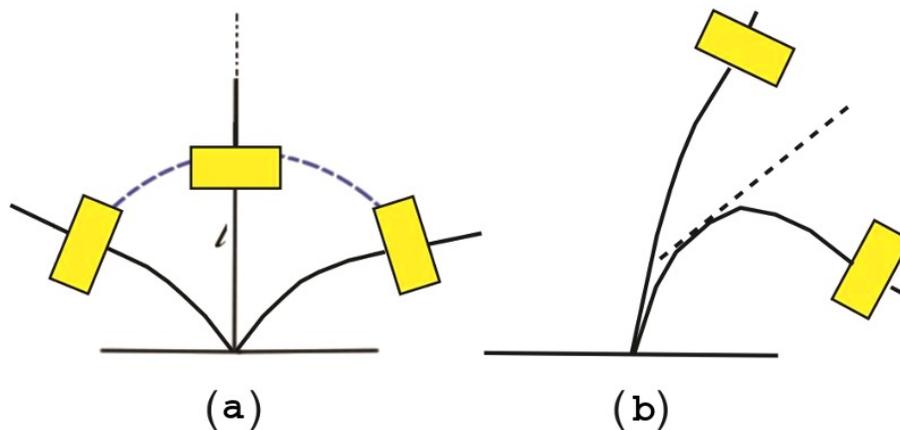


Figura 10: (a) Péndulo invertido de masa y longitud pequeña oscilando con simetría especular, el eje de simetría corresponde a la línea punteada ubicada en el eje vertical. (b) El mismo péndulo en el que se ha aumentado la longitud. Ahora oscila alrededor de una línea no vertical. Se ha roto la simetría izquierda-derecha.

Perturbamos al sistema aplicando una fuerza instantánea al péndulo invertido que lo haga oscilar de derecha a izquierda, y si la longitud es pequeña el péndulo oscila alrededor de la vertical con simetría bilateral, especular o simetría izquierda derecha, ya que da lo mismo izquierda que derecha, como representamos en el diagrama de la Figura 10(a). Esta simetría es muy frecuente de encontrar, si echamos un vistazo a nuestro alrededor notaremos que esta simetría está en casi todas partes. Por ejemplo, si tomamos un espejo y lo colocamos ocultando la mitad de nuestra cara de forma que el reflejo en él complementa la mitad oculta, vemos nuestra cara completa sin modificación (pero sólo en el caso que seamos guapos y nuestra cara presente simetría especular).

En nuestro sistema de péndulo invertido el eje de simetría es la línea ver-

tical que pasa por la varilla del péndulo. Ahora, si incrementemos la altura de la masa paulatinamente y el péndulo oscilará alrededor de la vertical pero con una frecuencia cada vez menor. Al llegar a una altura mayor que cierto valor crítico l_c , observamos algo inesperado. La masa rompe con el movimiento simétrico que tenía y empieza a oscilar alrededor de una línea inclinada hacia un lado, como se muestra en la Figura 10(b). Precisamente en este momento el sistema tuvo dos opciones, pues en principio puede oscilar en el lado izquierdo o en el derecho. El sistema prefirió uno de ellos, pero la simetría izquierda-derecha se ha perdido, presentó una bifurcación. La longitud l es en este caso el parámetro de bifurcación.

Una vez que el sistema exhibe una bifurcación en el régimen no lineal, el estado poco simétrico que se presenta es muy robusto. Además, en cada rompimiento de simetría o bifurcación el sistema tiene muchas más opciones visitar estados insospechados, mucho más complejos que el estado de equilibrio original. Estas dos cualidades son muy importantes en los sistemas biológicos, ya que en general de lo simple surge lo complejo (de un huevo muy simétrico surge una anatomía muy complicada, mucho menos simétrica) y los estados complejos resultantes de una bifurcación deben ser muy robustos ante cambios externos (los seres vivos sobreviven a las estaciones del año, por ejemplo).

MODELO BVAM

Para ejemplificar lo dicho hasta ahora nos referiremos a las ideas de Alan Turing, matemático inglés que en los años 50 publicó un artículo en el proponía un mecanismo no-lineal capaz de producir formas complicadas a partir de un huevo, es decir, la morfogénesis, término que él mismo acuñó. En el resumen de su artículo dijo⁷:

The purpose of this paper is to discuss a possible mechanism by which the genes of a zygote may determine the anatomic structure of the resultant organism. The theory does not make any new hypothesis, but merely suggests that certain well known physical laws suffice for explaining many facts⁸.

⁷El propósito de este artículo es discutir un posible mecanismo por el cual los genes de un cigoto pueden determinar la estructura anatómica del organismo resultante. La teoría no hace ninguna nueva hipótesis, sino que meramente sugiere que leyes de la física bien conocidas bastan para explicar muchos hechos.

⁸En: A.M. Turing F.R.S. *The chemical basis of morphogenesis*. Phil. Trans. Phil. Soc. London B127, 37 (1952).

Las leyes físicas que Turing menciona no son sino que las sustancias químicas en general reaccionan entre sí y se difunden en un medio. Las reacciones químicas en general se representan por cinéticas no-lineales y la difusión en general tiende a repartir por igual dichas sustancias. Lo genial de la idea de Turing es que bajo ciertas condiciones sucede lo contrario, es decir, que es precisamente la difusión la que causa que un estado uniforme y simétrico rompa la simetría y se forme un patrón espacial inhomogéneo en la concentración de las sustancias químicas.

Turing escribió un sistema en el que considera que dos sustancias reaccionan entre sí y se difunden con diferentes tiempos característicos (constantes de difusión). Desafortunadamente, a pesar de haber sido precisamente Turing el que inventó la computadora, no pudo realizar los cálculos numéricos que se necesitan para obtener la solución de sus ecuaciones y observar el patrón que producen.

Cincuenta años después de Turing nosotros creamos un modelo de reacción-difusión que es el más general cuando el sistema conserva la masa de las dos sustancias y si se consideran sólo no-linearidades cuadráticas y cúbicas en la cinética de reacción. Este sistema es conocido como el modelo BVAM (Barrio *et al.*, 1999).

Dicho modelo, al contrario de la mayoría de modelos anteriores, no fue pensado para modelar una reacción química específica, sino que fue desarrollado para estudiar el comportamiento general de las cinéticas químicas en presencia de difusión. Precisamente por esto no se da ninguna forma particular a las funciones que modelan la cinética, suponiendo la existencia de un punto fijo y expandiendo en una serie de Taylor alrededor de este punto hasta tercer orden. Este modelo ha sido usado en años recientes para estudiar diversos aspectos de la biología del desarrollo. Inicialmente nosotros lo aplicamos para describir los mecanismos que producen los patrones espaciales estacionarios que modelan la pigmentación de la piel de diversos peces marinos.

En el caso general este sistema presenta una variedad de bifurcaciones, del tipo Hopf, Hopf-Turing, ondas viajeras y frentes de onda no-lineales del tipo "solitón", e incluso caos. Las aplicaciones de ese modelo a sistemas biológicos son muy diversas, dada la generalidad del modelo, y pueden encontrarse en numerosas publicaciones, por lo que aquí sólo mencionaremos una aplicación interesante para modelar el funcionamiento y la muerte del pulso cardíaco.

EL CORAZÓN

Existen muchísimos modelos que investigan la actividad eléctrica del corazón. Casi todos ellos están basados en propagación de ondas en medios excitables. Las ondas espirales en el potencial de membrana de los miocitos pueden ser reproducidas de esta manera. Sin embargo, estos modelos son muy limitados, ya que no explican la robustez del ritmo cardiaco ante perturbaciones muy grandes, ni reproducen los fenómenos que se observan cuando el corazón falla, en particular, la aparición de pulsos irregulares de alta frecuencia observados en la aurícula derecha en el padecimiento llamado fibrilación auricular.

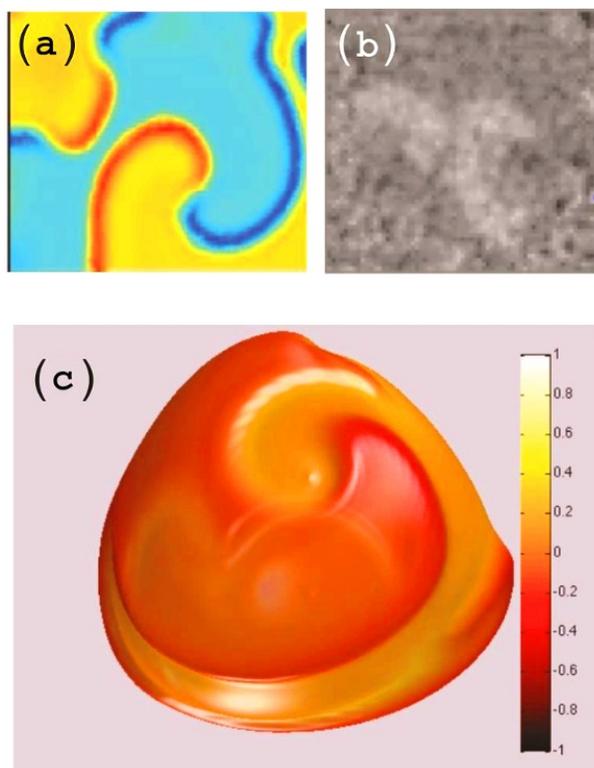


Figura 11: (a) Solución del sistema BVAM en un plano que muestra frentes de onda girando alrededor de puntos estacionarios (los que separan las regiones rojas de las azules). (b) Fotografía que muestra el potencial de membrana en el corazón de un pollo. Observe los frentes e onda que giran en forma análoga al resultado teórico. (c) Simulación del sistema BVAM en un dominio con forma de aurícula mostrando las contracciones musculares producidas por el potencial de membrana.

Si en el modelo BVAM se sitúa uno muy próximo a la línea crítica que separa una bifurcación de Hopf pero manteniendo los dos puntos fijos diferentes de cero como estables, el sistema se dice que es biestable y aparecen frentes de onda (solitones⁹) cuya velocidad en dos dimensiones depende de la curvatura local del frente, de forma que en los puntos donde la curvatura cambia de signo la velocidad es cero. Esto tiene como resultado que los frentes giren, dando la impresión de ser ondas espirales. El resultado de este cálculo en un plano, con condiciones periódicas a la frontera, se muestra en la Figura 11(a).

Este comportamiento es muy parecido al que se observa experimentalmente con una técnica que revela el potencial de membrana en el corazón de un pollo, que se muestra en la Figura 11(b). Obviamente el corazón no es plano, sino que las señales eléctricas se propagan en una superficie cerrada con cierta curvatura. Para constatar que el resultado teórico reproduce las palpitaciones del corazón, en la Figura 11(c) mostramos una simulación hecha en una superficie cerrada con curvatura variable, en el cual el nivel de concentración de se traduce en una contracción del radio. Actualmente nos encontramos investigado la ruta al caos que este sistema teórico presenta, ya que existen experimentos en que se muestra que la forma en que se produce la muerte por fibrilación auricular en el corazón es muy peculiar y serviría para validar nuestro modelo.

CONCLUSIONES

En la investigación científica moderna en biología se tienen que usar, no sólo técnicas experimentales sofisticadas y métodos masivos de adquisición de datos, sino que además se debe contar con un conocimiento teórico profundo de todos los elementos y procesos que se producen en el sistema de estudio. Esto conlleva a que, en el presente, la mayoría de los grupos líderes en la investigación biológica converjan especialistas expertos en muchas disciplinas, entre los cuales los físicos teóricos y experimentales son fundamentales.

Aquí he tratado de mostrar el gran papel que juega la Física actualmente en ámbitos alejados de su interés habitual. Mostrando como los conocimientos básicos de la Física deben ser tomados en cuenta en el desarrollo de las ciencias biológicas, y en particular, la utilidad que los principios básicos se revelan en el diseño de nuevos experimentos.

⁹Los solitones mas conocidos son los famosos y destructivos “tsunamis”, que tienen la particularidad de ser ondas que no disipan energía

Es este breve escrito he dejado fuera asuntos muy importantes, tanto históricos como prácticos. Entre ellos cabe mencionar el uso universal de isótopos radioactivos en medicina curativa y de diagnóstico, los sistemas de imagenología y tomografía, que usan resonancia magnética nuclear, emisión de positrones, superconductores y sensores electrónicos sofisticados. Valga como disculpa el decir que numerosos escritos de divulgación se encuentran publicados en la internet, fácilmente accesibles para las personas interesadas en ahondar en ellos. Mi propósito al escribir este pequeño escrito es crear, en las personas que lo lean, alguna curiosidad en este tema.

BIBLIOGRAFÍA

Más detalles sobre casi todos los temas de este capítulo se pueden consultar en seis artículos de divulgación publicados en la revista digital de la UNAM en 2010, los cuales están disponibles en la red, en el siguiente enlace (visitado en julio de 2019): [Número especial sobre Complejidad](#).

Goepfert-Mayer M. *Über Elementarakte mit zwei Quantensprüngen*, Ann Phys 9(3): 273-95, (1931).

Zhang L. y Hernández V.S. *Synaptic innervation to rat hippocampus by vasopressin - immunopositive fibres from the hypothalamic supraoptic and paraventricular nuclei* Neuroscience, 139-162 (2013).

Kaiser W. y Garrett C.G.B. *Two-Photon Excitation in $CaF_2 : Eu_{2+}$* , Phys. Rev. Lett. 7, 229 (1961).

Abella I. D. *Optical Double-Photon Absorption in Cesium Vapor*, Phys. Rev. Lett. 9, 453 (1962).

Minsky M. *Microscopy apparatus*, Patente de los Estados Unidos No. [3013467](#), (1961)

Barrio R., Romero R., Noguez M., Azpeitia E., Ortiz Gutierrez E., Hernandez V., Alvarez-Buylla M.E. *Cell patterns emerge from coupled chemical and physical fields with cell proliferation dynamics: the Arabidopsis thaliana root as a study system*, PLoS Computational Biology (2013).

Barrio R.A., Varea C., Aragón J.L. y Maini P.K. *A Two-dimensional Numerical*

Study of Spatial Pattern Formation in Interacting Turing Systems Bull. Math. Biol., 483 (1999). (Modelo BVAM).

Barrio R.A., Electronic Journal of Theoretical Physics, No. 15 :1-26 (2007).

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

DESARROLLO DE NUEVAS FUENTES DE RAYOS X EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XXI

*Xim Bokhimi**

LOS ELECTRONES Y SUS CAMBIOS DE ENERGÍA

EL electrón es una partícula a la cual, hasta la fecha, no se le ha encontrado una estructura, es decir, no se ha encontrado que esté compuesto por otras partículas. Por lo cual se le considerara una partícula elemental.

Sin embargo, el electrón siempre coexiste con fotones, como si juntos formaran parte de la estructura de otra partícula. Si un electrón pierde energía, un fotón es emitido con una energía que es igual a la perdida por el electrón. Si por el contrario, un electrón interacciona fuertemente con un fotón, el electrón absorbe toda la energía del fotón y pasa a un estado de energía mayor que la inicial. Un ejemplo del primer caso lo tenemos cuando encendemos un foco: primero los electrones son excitados calentando el filamento del foco, un tiempo después del orden de 10^{-12} segundos, los electrones regresan a su energía inicial y emiten fotones, los cuales percibimos como luz. Un ejemplo del segundo caso lo tenemos en las celdas fotovoltaicas, en donde la luz que llega del sol es absorbida por los electrones, generando una corriente eléctrica.

Como se trata de presentar un análisis cuantitativo de la emisión de fotones, empecemos por analizar en detalle el número de fotones en el espectro del visible que son emitidos por un foco cada segundo. Consideremos que el foco es alimentado por una fuente de corriente alterna de $V = 120$ V, y que su potencia es de 50 Watts, lo que genera una corriente eléctrica (producida por un flujo de electrones) en el filamento del foco de 0.417 A. Como 1 Ampere es igual a 1 Coulomb por segundo, y cuando la corriente eléctrica es producida únicamente por electrones, un Coulomb equivale a

*Departamento de Materia Condensada, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

$6,241 \times 10^{18}$ electrones, entonces la corriente que pasa en el filamento es de $2,6 \times 10^{18}$ electrones/s. Como la eficiencia de este tipo de lámparas para convertir la energía eléctrica en luz en el espectro del visible es de alrededor del 1%, entonces sólo este por ciento de los electrones producen luz visible. De manera que un foco de 50 Watts, emite alrededor de $2,6 \times 10^{16}$ fotones/s. Cantidad de fotones que, como veremos a lo largo del escrito, es similar a la emitida en un sincrotrón. Los diodos laser actuales empleados en la iluminación tienen un eficiencia 10 veces mayor que los focos, y su emisión de luz se produce en un ángulo sólido menor que en un foco. Por lo tanto para tener un mayor número de fotones por mm^2 , se requiere excitar un menor número de electrones, lo que reduce la energía consumida en la iluminación. Veremos a lo largo del documento que parámetros similares son también importantes en el desarrollo de las fuentes de rayos X.

En el presente escrito, la propiedad más importante que se analiza de los electrones, es el hecho de que emiten fotones cuando son acelerados. Propiedad que se explota para producir fotones de energías diferentes, desde ondas de radio, que corresponden a fotones cuyas energías son del orden de 1 microelectronvolt (μeV), los cuales se emplean en telecomunicaciones; hasta rayos X, cuyas energías pueden ser del orden de 100 kiloelectronvolts (KeV), los cuales tienen amplio uso en estudios básicos, en la industria y en el sector salud. La unidad de energía en el sistema internacional de unidades es el Joule, sin embargo, por comodidad, para el resto del presente documento, es mejor usar como unidad de energía el electronvolt (eV), cuya unidad está definida como la energía que adquiere un electrón libre cuando se acelera en un voltaje de 1 Volt.

Para producir fotones empleando electrones, lo primero que se debe hacer es llevar los electrones a una energía suficientemente alta de manera que al disminuir su energía emitan fotones.

Hay varios mecanismos para llevar los electrones a una energía determinada, dependiendo de si están casi libres (en donde tienen un continuo de estados disponibles) o bien ligados a un átomo (en donde tienen un número discreto de estados disponibles).

Si los electrones están libres, para aumentar su energía se les acelera aplicándoles un campo eléctrico o un campo magnético. Un ejemplo de ello es el acelerador de electrones que se usa en un microscopio electrónico, o en tubo de rayos X. En estos casos los electrones son acelerados mediante un potencial del orden de decenas de miles de volts, en una región de un centímetro, con ello los electrones están sujetos a un gradiente de potencial entre $10^4 - 10^5$ V/cm, de manera que si los electrones son acelerados a lo

largo de un centímetro su energía cinética final estará entre $10^4 - 10^5$ eV (10-100 KeV, $1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV}$).

En este rango de energías los electrones alcanzan una velocidad (v) cercana a la velocidad de la luz ($c = 299,792,458 \text{ m/s}$). Cuando la energía cinética es de 10 KeV, la relación v/c es 0.1949, mientras que para una energía cinética de 100 KeV esta relación es 0.548. En este punto es interesante recordar que la energía relativista asociada a la masa del electrón en reposo (m_0) es $m_0c^2 = 510.998 \text{ KeV}$, en donde $m_0 = 9.10938188 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

El primer acelerador de electrones fue inventado en 1857, cuando fue posible producir vacíos de 0.00001 atmósferas (1 Pascal). Como en estos aceleradores los electrones se originaban en el cátodo, en aquel entonces a los electrones se les llamó rayos catódicos, y al acelerador mismo se le llamó "tubo de rayos catódicos".

Este tubo de rayos catódicos fue ampliamente utilizado en el siglo XIX para estudiar las propiedades de los rayos catódicos, los cuales con el tiempo fueron identificados con los electrones. Entre las propiedades descubiertas de los electrones destaca la que tienen de generar radiación electromagnética cuando interactúan con los electrones de los átomos, y en especial la radiación electromagnética identificada como rayos X.

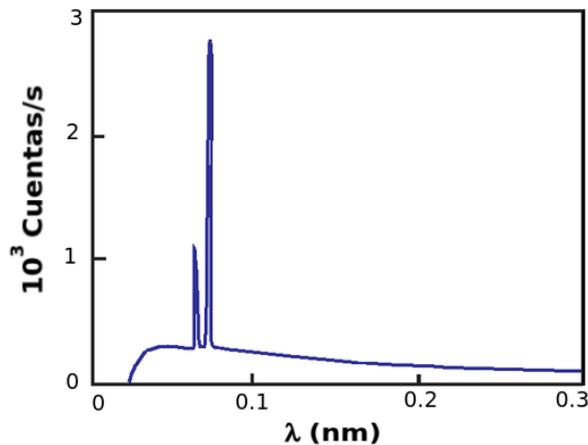


Figura 1: Rayos X emitidos por un material cuando es irradiado con electrones.

La Figura 1 muestra el espectro de rayos X que emite una lámina delgada de molibdeno cuando sobre ella inciden electrones con energía de 40 KeV. En esta figura se muestran dos contribuciones diferentes al espectro de rayos X. Por un lado un conjunto discreto de picos angostos cuyo origen

está relacionado con el número de electrones en los átomos que forman la lámina de molibdeno, y por otro lado una curva continua que está relacionada con la desaceleración de los electrones incidentes al interactuar con los núcleos de los átomos de molibdeno. En los siguientes párrafos analizaremos en detalle cada una de estas contribuciones.

ORIGEN DE LAS LÍNEAS DISCRETAS EN EL ESPECTRO DE RAYOS X

Cuando el haz de electrones interactúa con los átomos que constituyen la lámina de molibdeno, algunos de los electrones de estos átomos son desplazados, dejando sus orbitales vacíos.

Un átomo, al perder uno de sus electrones queda en un estado excitado, el cual es inestable y tiene una vida media muy corta que varía entre 10^{-6} a 10^{-15} segundos. Después de este tiempo, otro electrón del mismo átomo, con una energía mayor que la del electrón que fue desplazado, ocupa el lugar de este y emite en forma de fotón el exceso de energía (E_{foton}) que tenía respecto a la energía del nuevo sitio que ocupa. La energía de este fotón está relacionada con la frecuencia ν de oscilación de sus campos eléctrico y magnético mediante la relación $E_{foton} = h\nu$ en donde h es la constante de Planck ($h = 4,135667516(91) \times 10^{-15}$ eV · seg).

Al desplazarse un fotón (a la velocidad de la luz c), sus campos eléctrico y magnético tienen la misma intensidad y dirección una vez que ha recorrido la distancia λ , la cual es la llamada longitud de onda del fotón. El fotón queda entonces bien definido si se proporciona su energía, su frecuencia o su longitud de onda.

Analicemos ahora, diferentes situaciones cotidianas en que los electrones son desplazados de sus posiciones en el átomo.

Durante una tormenta, las nubes se cargan de electrones produciendo una carga electrostática, la cual crece hasta producir la ionización y aceleración de las moléculas en el aire (básicamente nitrógeno y oxígeno). Al chocar estas moléculas entre ellas, algunos de sus electrones son desplazados, lo que produce fotones, algunos con longitudes de onda en la región del visible ($400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$) generando el llamado relámpago, otras en la región del ultravioleta ($22.8 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$), otras en región de las ondas de radio ($0.5 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$), las cuales podemos detectar cuando tenemos encendido un radioreceptor; este registra una interferencia cuando se produce el rayo. Si estuviéramos en la cercanía física del rayo y contáramos con el detector apropiado, detectaríamos también la presencia de los rayos X emitidos por el nitrógeno y el oxígeno ($2 \text{ nm} < \lambda < 4 \text{ nm}$). Otro ejem-

plo típico del desplazamiento de los electrones de los átomos, es cuando se golpea una piedra con un martillo. El desplazamiento de estos electrones produce, entre otros, fotones cuya frecuencia corresponde al visible, generando la chispa que observamos al golpear la piedra con el martillo.

En los dos ejemplos anteriores no se tiene control sobre la energía con que se incide sobre un átomo para desplazar sus electrones. Sin embargo, si bombardeamos al átomo con un haz de electrones que tienen una energía bien definida, podemos desplazar de manera selectiva sus diferentes electrones, y con ello inducir la emisión de fotones cuando los orbitales vacíos son ocupados por otros electrones del átomo con una energía mayor que la correspondiente a la que tenían los electrones desplazados.

Cuando la energía de los electrones del haz incidente es suficientemente grande, estos logran desplazar a los electrones de la capa *K* de los átomos sobre los que incide el haz. Los orbitales vacíos que dejan estos electrones son ocupados preferentemente por los electrones de los átomos de las capas energéticamente cercanas a los orbitales vacíos, es decir, por los electrones que ocupan las capas *L* y *M* del átomo (Figura 2).

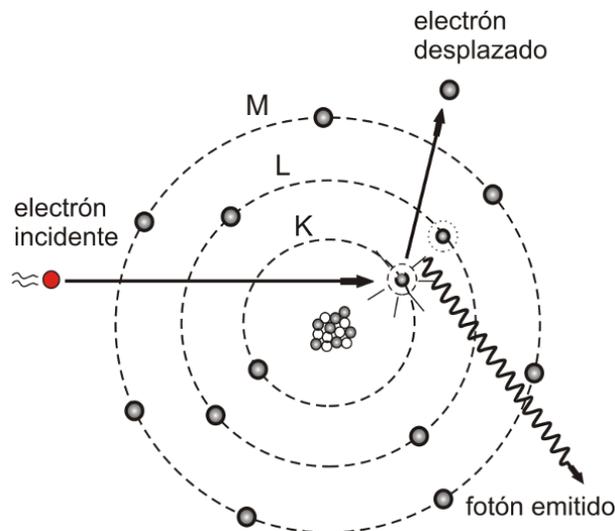


Figura 2: Cuando un haz de electrones incide sobre un electrón de un átomo en la capa *K*, este es desplazado, y su orbital es ocupado por un electrón de la capa *L* del mismo átomo.

Cuando los electrones de las capas *L* o *M* ocupan el orbital vacío de la capa *K*, emiten la diferencia de energía en forma de fotones, los cuales se les identifica con la letra *K*.

La energía mínima de los fotones de rayos X que se pueden generar mediante este mecanismo corresponde a los rayos X de litio, la cual es de 0.0543 keV y la máxima para los generados en átomos de Lawrencio con una energía de 151.82 keV.

Vemos entonces que el espectro discreto de rayos X es producido por la disminución de energía de los electrones en el átomo al ocupar orbitales vacíos que se generan cuando otros electrones del átomo son desplazados. La distribución de los fotones es discreta, porque el número de estados disponibles para ser ocupados por los electrones es también discreto.

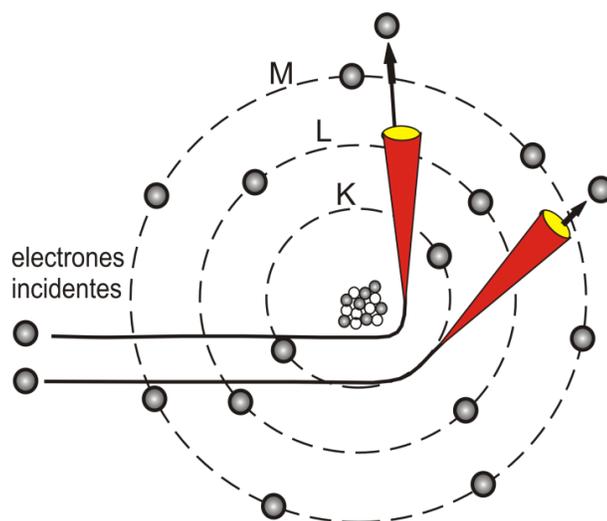


Figura 3: Al pasar un electrón incidente cerca del núcleo de un átomo, sufre una fuerte aceleración, lo que lo hace emitir rayos X (“bremsstrahlung”)

ORIGEN DEL ESPECTRO CONTINUO DE RAYOS X

Cuando un electrón del haz de electrones con energía cinética $K_{inicial}$ interactúa con los electrones y los núcleos de los átomos en la lámina de molibdeno, pierde parte o toda su energía cinética, y emite un fotón cuya energía es igual al cambio de energía cinética del electrón incidente (Figura 3). Si K_{final} es la energía cinética final de este electrón, entonces la energía del fotón emitido está dada por $E_{foton} = K_{final} - K_{inicial} = h\nu$. En donde h es la constante de Planck, y ν es la frecuencia asociada al fotón emitido. El cambio máximo de energía corresponde al caso en que la energía cinética final del electrón incidente sea cero después de interactuar con un núcleo

de los átomos de molibdeno.

Esto explica porque el espectro continuo de emisión de rayos X inicia en un valor mínimo de longitud de onda (Figura 1). Para obtener este valor máximo de la energía del fotón, se considera que la energía de retroceso que adquiere el núcleo del átomo durante la colisión con el electrón incidente es despreciable.

Los fotones emitidos al disminuir la energía cinética de los electrones incidentes son producto de la desaceleración (“frenado”) de los electrones, y se le conoce con el nombre de “bremsstrahlung” (palabra compuesta de las palabras del idioma Alemán “bremsen”, frenar, y “Strahlung”, radiación, cuya traducción literal al castellano es “radiación de frenado”). Palabra que usaremos en el presente escrito para describir este mecanismo de emisión de fotones.

Debe hacerse notar que el espectro de rayos X continuo se origina principalmente por el bremsstrahlung generado por la interacción entre los electrones incidentes con el campo eléctrico producido por los núcleos de los átomos. De acuerdo a la Figura 3, la aceleración producida por el núcleo del átomo sobre los electrones incidentes es perpendicular a la velocidad de estos. Esto hace que la distribución angular de los fotones emitidos esté aproximadamente a lo largo de un cono circular recto con su eje orientado a lo largo de la velocidad instantánea del electrón. La apertura del cono disminuye conforme aumenta la energía del electrón. Para electrones de baja energía (como es el caso del bombardeo de la lámina de molibdeno con electrones acelerados en un potencial de 40 KV) el ángulo promedio de apertura de la radiación emitida es de 50.7 grados (886 mrad).

Este tipo de radiación se puede generar también acelerando de manera controlada el haz de electrones en un campo eléctrico paralelo a su dirección de movimiento y desacelerándolos posteriormente al hacerlos interactuar con campos eléctricos y magnéticos externos variables en el espacio y perpendiculares a su dirección de movimiento. Ejemplo de sistemas para la generación de rayos X por este método son los sincrotrones, los cuales analizaremos en detalle en los siguientes párrafos.

RADIACIÓN DE RAYOS X GENERADA EN UN SINCROTRÓN

Como se mencionó anteriormente, el tubo de rayos catódicos fue el primer acelerador de electrones, y fue inventado en el siglo XIX. Con él se empezó a conocer la estructura de los átomos, en donde los electrones (partículas ligeras) giran (en un número discreto de estados) alrededor de un

núcleo (partícula pesada), esta estructura se infirió a partir de los rayos X emitidos al interactuar un haz de electrones externos con los átomos (Figura 1).

Después de confirmada la presencia del núcleo atómico, a principios del siglo XX, se inició el desarrollo de nuevos tipos de aceleradores con la intención de conocer más sobre la estructura de los átomos, y en particular sobre la estructura de sus núcleos. Desarrollo que continúa aún hoy en día para conocer más detalles sobre esta estructura.

La idea básica de los nuevos tipos de aceleradores, al igual que en el tubo de rayos catódicos, es acelerar partículas cargadas (electrones, protones, iones, etc.) en campos eléctricos o magnéticos. Las velocidades de estas partículas cargadas pueden ser constantes o variables en el espacio y/o en el tiempo. Por la trayectoria que siguen estas partículas, los dispositivos que se han empleado para acelerarlas han sido divididos en dos tipos: los aceleradores lineales, en donde la aceleración es paralela a la velocidad de la partícula cargada; y los aceleradores circulares, en donde la aceleración es perpendicular a la velocidad de las partículas cargadas.

De los aceleradores circulares destaca el sincrotrón, en el cual un campo magnético variable mantiene el electrón en su órbita circular a la vez que lo acelera. En este tipo de aceleradores los electrones pueden adquirir energías cinéticas de decenas de GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$). La desviación de los electrones por el campo magnético, es similar a la descrita cuando un haz de electrones es desviado al pasar cerca del núcleo atómico.

Esta desviación de los electrones sufrida por la interacción con el campo magnético externo genera la emisión de fotones (Figura 4), cuyas características son similares a las descritas en los párrafos anteriores para el bremsstrahlung. Como la aceleración que genera la desviación es perpendicular a la velocidad de los electrones, la distribución angular de los fotones emitidos está a lo largo de un angosto cono circular recto con su eje orientado en la misma dirección que la velocidad instantánea del electrón y con un ángulo de apertura muy pequeño de sólo algunas milésimas de radian.

Este cono de emisión cerrado hace que los sincrotrones tengan un brillo intenso, del orden de 10^{13} fotones/s/mrad²/mm²/0.1 % ancho de banda (este ancho de banda equivale a la frecuencia ν dividida por mil). Para mantener a los electrones en la trayectoria circular es necesario compensar la pérdida de energía sufrida al emitir fotones por bremsstrahlung, lo cual se hace proporcionándoles una energía adicional. La energía de los fotones emitidos depende de la energía cinética E de los electrones que están girando en el sincrotrón; su longitud de onda tiene una distribución

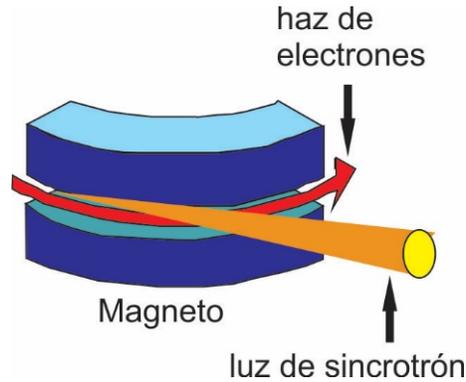


Figura 4: Al girar los electrones almacenados en un sincrotrón sufren una aceleración que da origen a la emisión de rayos X.

alrededor de una longitud de onda crítica λ_c que es proporcional al radio del sincrotrón e inversamente proporcional a la energía de los electrones.

Por ejemplo, para un sincrotrón con un radio de 134.4 m y electrones con una energía cinética de 6 GeV, la longitud de onda crítica λ_c tiene un valor de 0.3478 nm.

El sincrotrón sólo, como fuente de radiación, en particular como fuente de rayos X no es muy adecuado, ya que la intensidad de haz de fotones no es grande a pesar de que esté concentrada en un ángulo sólido pequeño. Además si se quisiera cambiar la longitud de onda de los fotones emitidos sería necesario cambiar el radio del sincrotrón, lo cual no es muy atractivo. En los siguientes párrafos mostraremos que hay otras alternativas mucho más eficientes para producir esta radiación, lo que dio origen a lo que se conoce hoy en día como sincrotrones de segunda y tercera generación. Como conclusión, el sincrotrón sólo, tal cual, no es una buena fuente de energía para producir rayos X.

RADIACIÓN DE RAYOS X GENERADA EN UN ONDULADOR

Si un haz de electrones con energía cinética E pasa por un arreglo periódico de campos eléctricos o magnéticos (Figura 5) ordenado perpendicular a la dirección del haz, los electrones emiten radiación. Si el ordenamiento del arreglo de los campos es paralelo al haz, también emiten radiación pero su intensidad es menor. Al arreglo físico periódico de campos se le da el nombre de "ondulador".

Analizaremos el caso en que el arreglo en el ondulador es generado con

campos magnéticos (Figura 5). El arreglo de los imanes que generan el campo magnético es tal que produce un campo magnético B dirigido a lo largo del eje x , cuya intensidad oscila en la dirección paralela al haz de electrones (eje z). Esto hace que los electrones sufran una aceleración variable a lo largo del eje y mientras se transportan a lo largo del eje z .

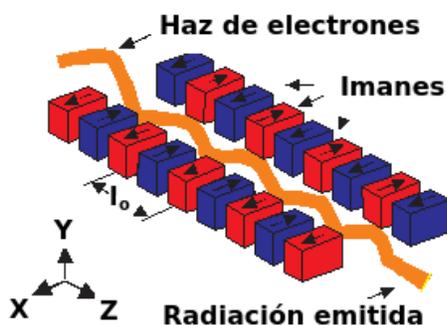


Figura 5: Al pasar un haz de electrones por un arreglo de imanes, los electrones sufren una aceleración que da origen a la emisión de rayos X con una frecuencia que está determinada por la periodicidad del arreglo.

El período de oscilación de los electrones está definido por la longitud l_0 a lo largo del eje z en que el campo magnético se repite (Figura 5). Esta aceleración de los electrones produce una radiación electromagnética con una longitud de onda λ , la cual es proporcional a esta longitud.

Cuando la energía de los electrones es mucho mayor que su energía en reposo, la distribución de los fotones emitida en el undulador se encuentra en un cono con su eje paralelo a la dirección del haz de electrones y un ángulo de apertura de sólo algunos miliradianes.

Demos como ejemplo de aplicación de los unduladores para generar radiación electromagnética el empleado al inicio de su descubrimiento. En ese entonces la intención era generar fotones en la región del visible, para lo cual se empleó un undulador de 40 mm de longitud, y un haz de electrones con una energía cinética de 95 MeV.

Con estos parámetros se encuentra que la velocidad de los electrones es 0.9999856877 la velocidad de la luz. El undulador con una l_0 de 40 mm genera un haz de fotones con una longitud de onda de 584.95 nm, la cual queda en la región del color verde, con una dispersión de 5.378 mrad (0.308 grados).

Un segundo ejemplo, lo tenemos para un haz de electrones con una energía cinética de 6 GeV (almacenado en un sincrotrón de 300 m de diáme-

tro), con un ondulator de longitud l_0 de 35 mm (ambos valores son típicos para las instalaciones de los grandes aceleradores actuales). En este caso la velocidad de los electrones es de 0.999999996373937 la velocidad de la luz, y la longitud de onda del haz de fotones generada es de 0.125 nm (la cual es similar a la empleada en un tubo de rayos X convencional con ánodo de cobre, 0.154 nm), con una dispersión de 0.08517 mrad (0.004880 grados).

El ondulator requiere entonces el suministro de un haz de electrones para emitir una radiación que depende de la longitud l_0 que describe la periodicidad del arreglo de campos magnéticos y de la energía de los electrones. Normalmente, esta energía es fija, y lo que se varía es el arreglo de los campos magnéticos. De esta manera, para una energía fija de los electrones se pueden generar fotones con diferente energía. La intensidad del haz de fotones depende del número de veces que el ondulator contiene la longitud inicial l_0 (un valor típico es 5) y de la intensidad máxima del campo magnético, la cual en general es menor a 1 Tesla (20 mil veces el campo magnético en la superficie de la tierra).

Debe aclararse que el ondulator genera radiación electromagnética de una manera diferente a como lo hace el sincrotrón sólo. Ambos dispositivos parten del hecho de que los electrones producen radiación al ser acelerados, como sucede en la generación del bremsstrahlung.

Las fuentes de radiación modernas basadas en aceleradores, combinan un acelerador de electrones, por ejemplo un sincrotrón, con un conjunto de onduladores. La radiación, proviene no del sincrotrón mismo, sino de los onduladores; sin embargo a la radiación proveniente de estos sistemas se le sigue llamando radiación de sincrotrón, aún en el caso de que los electrones que alimentan el ondulator provengan de un acelerador lineal. Una característica de estas instalaciones es su excesivo consumo de energía (asociada al sincrotrón), y la gran inversión de capital para crearlas.

Debe destacarse que recientemente se reporta la generación de rayos X en el rango de energías entre 1 y 200 KeV, con un sincrotrón de sólo 1 m de radio, el cual produce electrones con una energía de algunos decenas de MeV. Este sincrotrón usa como ondulator un intenso pulso de laser, con los fotones en el pulso moviéndose en dirección contraria al flujo de electrones. Este ondulator equivaldría a 20,000 periodos de un ondulator magnético convencional –En contraste, los onduladores magnéticos empleados en los grandes sincrotrones tienen un máximo de sólo unas decenas de períodos.

Si la longitud de onda del laser empleada en este pequeño sincrotrón es de 1.0 micrómetros, para producir rayos X de longitud de onda de 1 Angstrom, la energía que deben tener los electrones es de sólo 25 MeV. La brillan-

tez de estos sincrotrones pequeños es de 10^{12} fotones/s/mrad²/mm²/0.1 % ancho de banda, y su gran atractivo es que caben en un laboratorio estándar (4×5 m²). Este sincrotrón tiene un bajo consumo de energía y su costo es mucho menor al de un sincrotrón grande. Actualmente este tipo de sincrotrones “sobre la mesa” (conocido como “table-top” en el idioma Inglés, que he traducido como “sobre la mesa”) ya se encuentra en el mercado, inclusive con aditamentos para hacer tomografía y difracción de rayos X. Su precio es menor a los 10 millones de dólares.

Hablando sobre sincrotrones “sobre la mesa” (es decir de los que se puedan colocar en un laboratorio pequeño) que producen rayos X, se ha reportado el desarrollo de un sincrotrón en donde se genera bremsstrahlung al interactuar el haz de electrones en el círculo de almacenamiento del sincrotrón con un delgado alambre de un material sólido colocado en su trayectoria (por ejemplo molibdeno o tungsteno). Dado que el haz de electrones gira a velocidades cercanas a la de la luz, el número de veces que los electrones interactúan con el alambre es muy grande, lo cual produce un intenso haz de rayos X de bremsstrahlung. En los equipos actuales, se estima que cada electrón en el sincrotrón interactúa 100 veces con el alambre.

Dado que los rayos X se generan en este tipo de sincrotrones por el mecanismo de bremsstrahlung, la energía máxima de los fotones irradiados es la misma que la energía de los electrones incidentes. Es por ello que para obtener rayos X con energías de algunas decenas de KeV, la energía de los electrones del haz incidente es pequeña, también de sólo algunas decenas de KeV. Demos el ejemplo de este tipo de fuentes de rayos X para obtener fotones con una energía máxima de 20 KeV –Fotones con esta energía son típicos para muchos experimentos de difracción de rayos X, de tomografía y de fluorescencia de rayos X.

Para obtener estos fotones, la energía de los electrones es de sólo 4.5 MeV, los cuales se mantienen girando en un sincrotrón con una órbita de sólo 8 cm de diámetro. Esto hace que las dimensiones correspondientes del sincrotrón sean pequeñas (del orden de 1.5×1.5 m²). La densidad de rayos X que se obtiene con estos sistemas es de 1.4×10^{10} fotones/s/mrad²/0.1 % ancho de banda, con una brillantez (densidad/área emisora de fotones) de 1.4×10^{13} fotones/s/mrad²/mm²/0.1 % ancho de banda, y una dispersión angular de 125 mrad (7.16 grados); esta brillantez es similar a la de los sincrotrones de primera generación –La brillantez de los sincrotrones de la tercera generación es del orden de 10^{19} a 10^{22} fotones/s/mrad²/mm²/0.1 % ancho de banda.

La dispersión de 125 mrad de estos pequeños sincrotrones si es mayor

que la que se tiene en los sincrotrones de tercera generación (0.08517 mrad) pero para muchas aplicaciones esta dispersión angular tiene ventajas. Por ejemplo, cuando los rayos X se emplean en tomografía, en donde el haz de rayos X ilumina una región mayor del objeto de interés.

La fuente de rayos X que hemos descrito se encuentra disponible en el mercado, y es una buena alternativa como fuente de rayos X intensa y sintonizable, como en los grandes sincrotrones.

La generación de la radiación de sincrotrón requiere de un sistema con una sección de aceleración de electrones y otra de almacenaje, la cual es la parte más voluminosa y además requiere una gran inversión, sobre todo si los electrones son acelerados a energías del orden de los GeV.

Recientemente se ha demostrado que se pueden acelerar electrones a estas energías al hacer interactuar pulsos laser (Ti:safiro) de 5 TeraWatts (1 TeraWatt = 10^{12} Watts) con un plasma diluido generado por otro pulso laser. La aceleración ocurre en un campo de orden de 10^{10} V/cm en una región de sólo algunos centímetros –Se debe destacar que los láseres empleados actualmente para ello tienen dimensiones de alrededor de 10 metros.

Con este método actualmente se pueden generar pulsos de electrones casi monocromáticos y densidades de 10^{19} electrones/cm⁻³, los cuales se pueden inyectar a un ondulator magnético, o bien a un ondulator basado en un laser, para producir rayos X. Los pulsos de rayos X que se generan actualmente con estos dispositivos tiene una dispersión en energía de alrededor del 6%, la cual es muy grande para algunas aplicaciones de los rayos X; por ejemplo difracción, pero irrelevante para otras, por ejemplo la microtomografía.

El atractivo de estos sistemas es que pertenecen a la nueva generación de sincrotrones compactos (“sobre la mesa”) que requieren poco espacio y son de bajo costo (menor a 10 millones de dólares). Debe hacerse notar que esta nueva fuente de rayos X se encuentra en su etapa de desarrollo, y ya ha mostrado muy buenos resultados en la producción de rayos X con energías entre 1 y 100 KeV, con una brillantez de 1×10^{22} fotones/s/mrad²/mm²/0.1% ancho de banda, con una divergencia espacial de $1,5 \times 1,8$ mrad; la cual compete con la obtenida en los sincrotrones actuales (3^a generación). Estos resultados sugieren que este tipo de dispositivos serán, probablemente, las fuentes estándar de rayos X intensas en el futuro.

RADIACIÓN DE RAYOS X GENERADA MEDIANTE FRICCIÓN

Como lo mencionamos en un párrafo anterior, el desplazamiento de las nubes y la fricción entre ellas genera grandes campos eléctricos que ionizan los gases en la atmósfera, acelerando tanto iones como electrones, los cuales terminan colisionando. Esta interacción produce radiación electromagnética con longitudes de onda que van desde las ondas de radio hasta los rayos X.

Un fenómeno similar al anterior sucede cuando frotamos nuestro pelo con un peine (hasta ahora nadie ha demostrado la producción de rayos X en este caso), o bien cuando nos quitamos la ropa. En este último caso la producción de chispas con emisión de luz en la región del visible es bien conocida cuando tal acción se realiza en la oscuridad.

Formalmente, este fenómeno se conoce en la literatura como luminiscencia por fricción. Lo interesante en este caso, es que recientemente se ha demostrado que al desprender una cinta adhesiva, de donde se encuentra adherida, se produce radiación no sólo en la región del visible, sino también en la región de los rayos X. Inclusive, recientemente se ha reportado el primer generador de rayos X basado en este fenómeno. Con seguridad, a lo largo de este siglo XXI habrá sorpresas y esta será una de las fuentes de rayos X con intensidad baja que se usarán en la vida cotidiana.

De las curvas de rayos X reportadas para esta situación, se infiere que la radiación observada es bremsstrahlung, cuyo origen se debe a la desaceleración de electrones previamente acelerados a energías menores a los 100 KeV. Los rayos X se generan por pulsos con duración entre 1 y 2 ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ segundos). Estos electrones son los que se acumulan al separar la cinta adhesiva, pero, en realidad, no se tiene un certero mecanismo para explicar su aceleración. Se han hecho experimentos en donde la cinta adhesiva contiene molibdeno o plata. En ambos casos, el espectro de emisión de rayos X muestra la aparición de los rayos X característicos de estos elementos, los cuales se produjeron al interactuar los electrones acelerados con los átomos de molibdeno o de plata.

ARREGLOS DE FUENTES DE RAYOS X

Todos los aceleradores, incluyendo el tubo de rayos X convencional, requieren de una fuente de electrones para su aceleración. En el tubo de rayos catódicos original, esta fuente, era un cátodo de aluminio, del cual se desprendían los electrones al estar en presencia de un campo eléctrico intenso.

Posteriormente, a principios del siglo XX, este cátodo fue substituido por un filamento de tungsteno, el cual emite electrones al ser calentado a temperaturas elevadas cuando se hace pasar una corriente eléctrica por él. Este es el tipo de fuente de electrones que emplean los tubos de rayos X convencionales y las fuentes de electrones que alimentan a los sincrotrones.

Recientemente se han encontrado nuevos materiales, con microestructuras ordenadas de dimensiones de algunos nanómetros, que emiten electrones con mucha facilidad. Por ejemplo, los nanotubos de carbono, cuyas dimensiones han inducido a la invención de tubos de rayos X tan pequeños (de algunos mm de dimensión) y ligeros que se piensa usarlos para hacer exploraciones prospectivas de materiales en otros planetas. Estos nanotubos de carbono se han empleado para fabricar arreglos de tubos de rayos X de baja intensidad que pueden emplearse para hacer radiografías, con una consecuente disminución de las dosis de rayos X que recibe el objeto de estudio.

Estos arreglos de microtubos de rayos X, junto con los arreglos de detectores que se seguirán desarrollando, permitirán obtener micrografías de objetos con todo tipo de formas. Esto simplificará la tecnología empleada para realizar tomografías, y por ende reducirá el precio de los equipos empleados, y con ello el precio de las tomografías mismas.

Las aplicaciones de los rayos X también se diversificarán. Dado que las dosis de rayos X para tal fin disminuirán; se podrán hacer mucho más tomografías en un paciente sin riesgo de causarle daños colaterales. Además, el desarrollo de detectores digitales de rayos X, y el abaratamiento de las supercomputadoras personales permitirán reconstrucciones tridimensionales de la imagen de cualquier parte del cuerpo humano a bajo costo. Con el consecuente diagnóstico acertado del origen de muchas enfermedades, y por ende, su certera cura.

Todos estos desarrollos también beneficiarán a la industria en general. Debe destacarse también que permitirán incrementar nuestro conocimiento sobre el comportamiento de la naturaleza misma, lo que ayudará a un mayor desarrollo tecnológico, con la esperanza que esto conlleve también a un bienestar social.

El tema sobre las aplicaciones de estas nuevas fuentes de rayos X, abarcaría varios artículos de extensión similar al presente, lo que espero que nuestros estudiantes aborden, no sólo en cuanto a su resumen, sino preferentemente en cuando a su desarrollo y aplicación.

CONCLUSIONES

Durante el presente siglo XXI, las fuentes de rayos X se diversificarán y expandirán ampliamente. En un primer período se extenderá el uso de pequeños sincrotrones “sobre la mesa” en los laboratorios convencionales con una brillantez mayor que la los tubos de rayos X actuales, pero menor que la de los sincrotrones de 3ª generación.

Se desarrollarán fuentes de rayos X brillantes que serán empleadas tanto en los sincrotrones de la 4ª generación como en los laboratorios convencionales de las universidades, de los centros hospitalarios y de la industria. No se descarta la posibilidad que los sincrotrones de grandes dimensiones para producir rayos X desaparezcan y sean remplazados por las fuentes de rayos X basadas en la aceleración de electrones en plasmas mediante láseres. Tomando en cuenta que ambos tendrán una brillantez similar, pero la diferencia en sus costos de construcción y de mantenimiento será enorme.

Los arreglos de microfuentes de rayos X y de sus respectivos microdetectores tendrán un gran desarrollo, y serán empleados para hacer todo tipo de radiografías y tomografías con dosis de rayos X bajas. Lo que, junto con los desarrollos de supercomputadoras personales, permitirá formar imágenes tridimensionales a bajo costo, tanto del cuerpo humano como de muchos objetos de interés industrial.

Durante el presente siglo habrá mucha actividad sobre el desarrollo de estas nuevas fuentes de rayos X, lo cual hará que este tópico sea muy atractivo para la juventud que inicia su actividad de investigación científica y de desarrollo tecnológico.

Para aquellos que se interesen sobre las nuevas fuentes brillantes de rayos X en laboratorios convencionales, quiero mencionarles, que estas están en su etapa temprana de desarrollo. De manera que si en estos años se inician en este tópico, en relativamente poco tiempo podrán estar a la par de los grupos más desarrollados sobre el tema en el mundo, o bien podrán integrarse a ellos, de manera que puedan hacer desarrollos propios.

Las aplicaciones originales de estas fuentes requieren tener cerca a un grupo de desarrollo de las mismas, lo que permitirá adecuar las fuentes de rayos X a las necesidades específicas para las aplicaciones en que se tenga interés.

EL DESAFIO DE VER EL INTERIOR DEL CUERPO: LAS IMÁGENES MAMOGRÁFICAS

*María Ester Brandan**

IMÁGENES MÉDICAS

VEMOS lo que nos rodea porque la luz “visible”–proveniente del Sol o generada por un foco encendido– ilumina los objetos, el reflejo llega a los ojos, y de ahí a nuestro cerebro. Los objetos que llamamos opacos reflejan parte de la radiación luminosa en su capa exterior y absorben el resto en su interior, y por esto sólo podemos ver sus superficies. La luz visible no puede atravesar el grosor del cuerpo humano y entonces no vemos su interior (excepto aquellas cavidades, como la boca, que permiten observar la luz reflejada en su pared interna). Las imágenes médicas –que ayudan al diagnóstico o tratamiento médico– buscan remediar esta limitación y generan información sobre el interior del cuerpo usando radiación diferente de la luz visible. Se buscan formas de energía capaces de atravesar los tejidos y órganos y que sean luego detectadas por un sistema receptor. Las radiaciones más utilizadas en medicina son las ondas electromagnéticas, similares a la luz pero de energía diferente. Entre éstas, las más usadas son los rayos-X y los rayos gamma (en la radiología y la medicina nuclear) y las ondas de radiofrecuencia (en las imágenes de resonancia magnética). Con ultrasonido también se producen imágenes del interior del cuerpo, a través de la transmisión y reflexión de ondas mecánicas. En todas las modalidades, la información de la energía transmitida, emitida o reflejada, es detectada por un receptor de imagen que la transformará finalmente en información visible a los ojos, lo que llamamos la imagen.

* Departamento de Física Experimental, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

LAS RADIOGRAFÍAS

La imagen médica más conocida es la radiografía, inventada por Wilhelm Conrad Röntgen al descubrir los rayos-X en 1895. Se los llamó rayos X pues Röntgen entendió que eran diferentes a cualquier otro tipo de radiación conocida, aunque no sabía qué eran. En el caso ilustrado por la Figura 1, los rayos X, que son radiación no-visible y con un alto poder de penetración, atravesaron los huesos y músculos de la mano del colega de Röntgen, fueron más absorbidos por el hueso que por el tejido blando circundante, y los rayos que lograron atravesar la mano incidieron sobre una placa fotográfica registrando la información anatómica en su distribución de intensidad.



Figura 1: Radiografía de la mano del Prof. Alfred von Kolliker, de la Universidad de Wurzburg, tomada por WC Röntgen el 23 de enero de 1896. Ésta es la primera radiografía tomada en público y fue hecha durante una conferencia dada por Röntgen a la Sociedad Médica-Física de Wurzburg casi 3 meses después del descubrimiento de los rayos X. La imagen en la figura es la impresión del negativo; generalmente uno observa directamente el negativo y por eso los colores blancos y negros se ven invertidos respecto de una radiografía normal. Fuente: [Wikipedia](#) (dominio público).

Este ejemplo, de valor histórico ya que fue la primera radiografía realizada de manera pública, ilustra los tres elementos esenciales de las imágenes llamadas de transmisión: una fuente de radiación externa al objeto de interés, el objeto mismo, y el receptor de la imagen. En otro tipo de imágenes, llamadas de emisión, la radiación es emitida por un objeto de interés al interior de otro, lo atraviesa, y es detectada en el exterior. Las imágenes, de emisión, generalmente proporcionan información sobre el funcionamiento del objeto de interés. Un tercer tipo de imágenes, denominadas de reflexión, son similares a las fotografías comunes realizadas con luz visible, y pueden usar radiación más penetrante que la luz.

Las radiografías médicas son imágenes del interior del cuerpo humano obtenidas a partir de la atenuación de los rayos X. Estos son ondas electromagnéticas que inciden uniformemente sobre el objeto de interés, una mano, el tórax, la cabeza, y se atenúan por las estructuras encontradas a lo largo de su camino. Los órganos y estructuras dentro del cuerpo absorben de manera diferente los rayos de acuerdo con su composición química, densidad y grosor. Así, producen “sombras” de diferente magnitud en el receptor de imagen que se encuentra atrás del objeto.



Figura 2: Radiografía de una fractura en la falange proximal de un dedo de la mano (señalada por la flecha). Fuente: [M.E. Oetgen y cols \(2008\)](#). Tomada del sitio Open-i de NLM ([National Library of Medicine](#)).

La física de la interacción nos enseña que la atenuación depende de la

energía de los rayos X y del número atómico del objeto, que identifica su composición elemental. Por esto, las radiografías son un mapa bidimensional de coeficientes de atenuación y de grosores máxicos de material atravesado. El objeto, que es tridimensional, resulta colapsado en sólo dos dimensiones, igual que la sombra de los objetos proyectados por la luz sobre una pantalla. Como los rayos X son “penetrantes”, es decir, pueden atravesar varios centímetros de agua y elementos ligeros, también vemos la proyección de los objetos internos. Además de ser planas, las radiografías son imágenes “en negativo”, muestran en color blanco la alta atenuación (por ejemplo, los huesos) y en gris oscuro la atenuación débil (causada por los tejidos o por el aire). La Figura 2 es una radiografía adquirida con un equipo médico moderno.

LA “CALIDAD” DE UNA IMAGEN

Los elementos técnicos, posibles de medir, que determinan la utilidad de una imagen médica constituyen su “calidad”. Tres elementos principales determinan la calidad de una imagen: el contraste, la resolución espacial y el ruido. Contraste es la diferencia de tonos de gris (color en la escala negro-blanco) entre un objeto y otro en la imagen. Probablemente éste sea el elemento más importante para la visibilidad de un objeto ya que distinguirlo requiere que su tono de gris sea diferente del fondo que lo rodea. La resolución espacial es el tamaño de los objetos más pequeños que se puedan ver como diferentes; esta propiedad está fuertemente asociada con la nitidez, y es opuesta a la borrosidad. El tercer elemento es el ruido, constituido por las fluctuaciones en la imagen debidas al proceso estocástico de detección de la radiación, al funcionamiento del detector o a fallas en alguno de los elementos del sistema. Similar al sonido que llamamos ruido, en imágenes “ruido es aquello que dificulta poder ver lo que deseamos ver”, en palabras de R Bourne. En general, una imagen de alta calidad tiene alto contraste, alta resolución espacial y bajo ruido. La imagen de la Figura 2 cumple con los 3 requisitos de calidad: el contraste es excelente y los huesos se distinguen claramente del tejido blando que los rodea; la resolución espacial es alta, no hay borrosidad, los bordes de los huesos son nítidos, incluso se puede observar la estructura trabecular –o esponjosa– de algunos huesos; y el ruido es tan bajo que casi no se distinguen fluctuaciones en el tono de gris de las estructuras homogéneas. Las componentes que constituyen un equipo moderno de imagen clínica han sido diseñadas y optimizadas para brindar niveles de contraste, resolución y nivel de ruido apropiados para el uso mé-

dico esperado de la imagen. Para el caso de las imágenes radiográficas de la glándula mamaria, llamadas mamografías o mastografías, el equipo de imagen se conoce como mamógrafo o mastógrafo.

LAS MAMOGRAFÍAS

La radiografía de la Figura 2 corresponde a una mano, parte del cuerpo que todos identificamos sin necesidad de saber anatomía. El contraste es muy bueno, en parte porque se obtuvo con un aparato de calidad, pero también porque los objetos radiografiados presentan un alto contraste intrínseco. Los rayos X son atenuados diferencialmente por elementos químicos diferentes y, en este caso, los huesos contienen calcio (lugar 20 en la Tabla Periódica de los Elementos) y los tejidos blandos están hechos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (lugares 6, 1, 8 y 7, en ese orden, en la Tabla). Un centímetro de hueso absorbe los rayos X unas 5 veces más eficientemente que un centímetro de tejido, y la cantidad de rayos que llegue finalmente al receptor de imagen será mucho menor detrás del hueso que del tejido. Se puede decir que los huesos proyectan sombras radiográficas mucho más intensas que el tejido cuando se exponen a rayos X. El contraste será muy alto. Es tal la facilidad con que se puede distinguir al hueso del tejido en un radiografía que la casi nula tecnología de Röntgen en la primera radiografía (Figura 1) no fue impedimento para que ¡hace más de cien años se vieran, sin problema alguno, los huesos de la mano del profesor von Kolliker!

La situación es totalmente diferente si queremos obtener una imagen radiográfica de la glándula mamaria. De manera general, se puede suponer que la mama femenina está compuesta por dos tipos de tejidos, el tejido fibroglandular, y el tejido adiposo. Ambos contienen los mismos tipos de átomos (C, H, O y N), aunque en proporciones algo diferentes. Esta similitud en composición elemental augura que la imagen radiográfica tendrá muy poco contraste, es decir, será difícil visualizar el tejido glandular rodeado del adiposo. Lamentablemente, éste es uno de los requisitos para identificar lesiones sugerentes de un posible cáncer. El reducido contraste intrínseco de los tejidos mamarios ha obligado a la búsqueda de condiciones técnicas de diseño y operación de los equipos mastográficos que maximicen el contraste de la imagen.

La condición más importante para la operación de un mastógrafo es la energía de los rayos X. La Figura 3 es una gráfica de los coeficientes de atenuación para rayos X en tejido adiposo, tejido glandular y tejido tumoral.

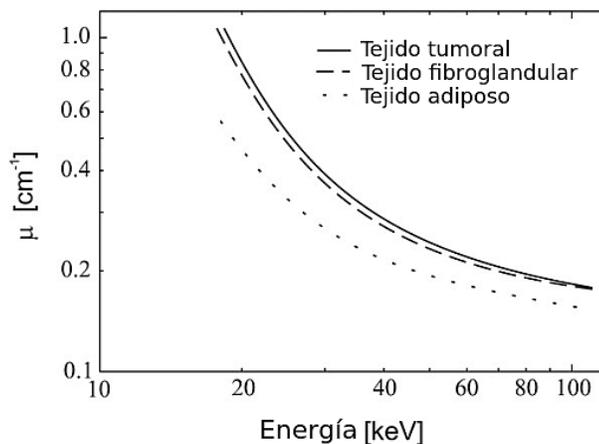


Figura 3: Gráfica de coeficientes de atenuación μ para rayos X como función de la energía de la radiación. Las curvas corresponden a los dos tejidos más importantes en una glándula mamaria: el tejido fibroglandular y el tejido adiposo. Adaptada de M.J. Yaffe (2008).

Esta magnitud cuantifica la probabilidad de que la radiación de una cierta energía sea absorbida por un cm de tejido. Vemos que las curvas son muy parecidas, sobre todo la del tumor y el tejido glandular, y que su diferencia aumenta a energías bajas. Como la imagen mamográfica debe reflejar contraste entre los diferentes tejidos, los mastógrafos operan produciendo haces de rayos X de energías tan bajas como sea posible.

Hay dos requisitos que impiden reducir demasiado la energía. El primero es que una fracción apropiada del haz incidente debe atravesar la mama y llegar al receptor de la imagen; por ello la atenuación no puede ser excesiva. El segundo está relacionado con la protección radiológica de la paciente ya que toda radiación, o dosis, absorbida por la mama puede causar un efecto biológico indeseado posteriormente. Tomando todo en cuenta, el compromiso entre calidad de imagen y dosis determina que la energía óptima sea de unos 20 keV. La unidad de energía es el keV, kiloelectron-Volt. Una mama comprimida tiene un grosor típico de 4 centímetros. Los valores en la gráfica de la Figura 3 indican que a 20 keV, 4 cm de tejido adiposo absorben el 84 % de los rayos que lo atraviesan, mientras que 4 cm de tejido glandular absorben el 96 %. La diferencia entre estos valores se reflejará en la imagen como contraste entre los tejidos. La Figura 4 muestra dos mamografías de una misma paciente; las estructuras blancas al interior de la mama son la imagen del tejido fibroglandular, que es más atenuador, rodea-

do por el tejido adiposo, menos atenuador, y consecuentemente más oscuro en la imagen.

Otro factor importante en el diseño de un mastógrafo es la placa de compresión que comprime la mama contra la base del aparato. La compresión es clave para lograr una imagen de calidad ya que uniformiza el grosor del objeto facilitando la interpretación de la imagen por el radiólogo. Además, asegura que el objeto no se mueva durante el segundo que dura la exposición a la radiación. También distribuye lateralmente el tejido ayudando a que los tejidos se separen y no “se hagan sombra” unos con otros, y disminuye la cantidad de radiación dispersada que deteriora el contraste y aumenta la dosis recibida por el cuerpo de la paciente. Esta compresión mecánica es frecuentemente causa de protestas por parte de las pacientes debido a que llega a ser molesta e incluso dolorosa. Quizás si se conocieran sus beneficios resultaría mucho más tolerable. O, al menos, pensar en los beneficios serviría de distracción durante los 5–10 segundos que dura la compresión.

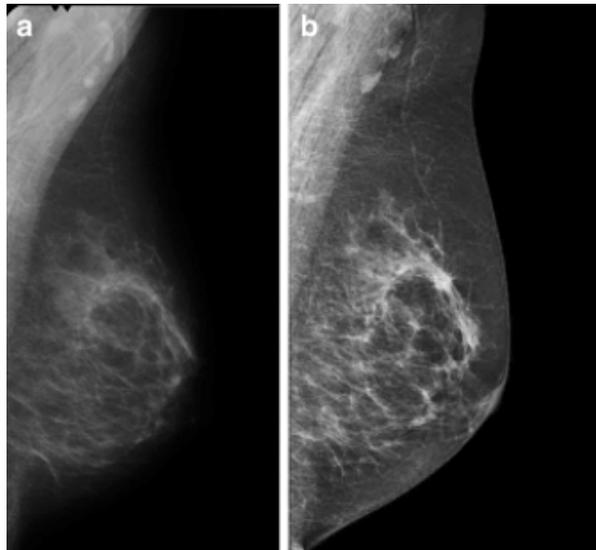


Figura 4: Mamografías de una misma paciente, adquiridas con diferente tecnología: (a) imagen tomada con un sistema convencional, en que el receptor de la imagen fue una placa radiográfica; (b) imagen adquirida con un sistema digital de detector fijo. Las imágenes corresponden a la proyección “medio lateral oblicua” y el sector más blanco en el extremo superior izquierdo es la imagen del músculo pectoral. Fuente: [A.M. Bluekens y cols \(2010\)](#). Imagen tomada de Open-i, página de la NLM ([National Library of Medicine](#)).

El siguiente elemento esencial en la calidad de la imagen mamográfica es el receptor de imagen. Hasta el cambio de siglo, hace unos 20 años, las mamografías –así como la mayoría de otras imágenes radiográficas– se obtenían en una placa radiográfica. Ésta es una placa plástica, flexible, recubierta con una gelatina sensible a la luz, muy similar a los rollos de película fotográfica que se usaban en las cámaras de fotos analógicas. La placa se instala en la parte baja del mastógrafo, después de la mama, sellada de la luz dentro de una caja llamada chasis que tiene en una de sus caras una pantalla fluorescente, llamada intensificadora, que convierte la energía de los rayos- X en luz visible. Los mastógrafos que usan esta combinación de película/pantalla se conocen como convencionales o analógicos. En mamografía, la resolución de la película determinará en buena parte la resolución de la imagen, y las placas para mamografías tienen granos de sales de plata de unos pocos micrómetros de tamaño. Esto da una resolución considerada óptima para visualizar las diminutas microcalcificaciones que pueden ser indicadoras de un carcinoma. Las pantallas intensificadoras han evolucionado en su calidad y eficiencia de conversión, permitiendo obtener imágenes de buena calidad cada vez con menos rayos X, lo que disminuye la dosis que recibe la glándula mamaria de la paciente. La Figura 5 muestra el esquema de un mastógrafo.

LA TÉCNICA MAMOGRÁFICA ACTUAL

Las primeras imágenes radiográficas de la glándula mamaria datan de 1913, cuando el cirujano berlinés Albert Salomon radiografió unas 3000 mastectomías, es decir, tejido extirpado quirúrgicamente, pudiendo distinguir en las imágenes diferentes tipos de cáncer. Se considera que este trabajo dio inicio a los estudios mamográficos. Siguiéron los estudios *in vivo* (en pacientes) y poco a poco las características de la técnica se fueron perfeccionando. El médico uruguayo Raúl Leborgne identificó microcalcificaciones en una fracción importante de los cánceres de mama visibles en las imágenes y asoció su presencia no sólo a las lesiones extensas sino también a las incipientes, otorgándole a este elemento visible en la imagen un valor diagnóstico. Sus importantes aportes incluyen haber reconocido la importancia de la compresión de la mama para obtener una buena imagen y haber usado rayos X de baja energía. La técnica fue reconociéndose como valiosa y en los 60s se realizó el primer ensayo clínico en una población de mujeres, en la ciudad de Nueva York, usando juntos el estudio clínico y la mamografía para analizar si ambos lograban reducir la mortalidad por cáncer de

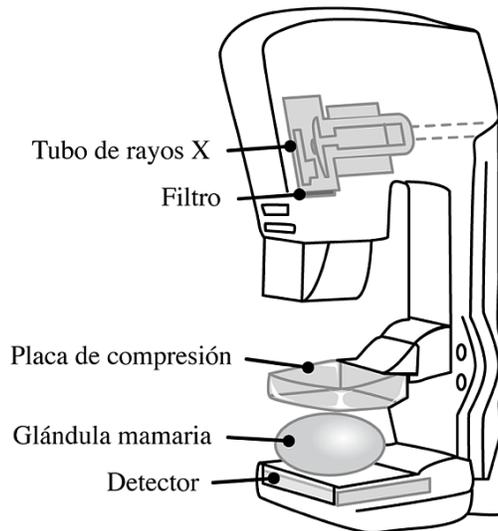


Figura 5: Los elementos principales de un sistema mamográfico. En un mastógrafo convencional, el chasis con la película radiográfica va en la posición del detector. En un mastógrafo digital, en el mismo lugar se ubica el detector, fijo o flexible.

mama. Los resultados fueron espectaculares ya que la mortalidad se redujo en casi un tercio en el grupo que se realizó la mamografía y, gracias a esto, se detectó tempranamente el cáncer permitiendo luego ser curado. Este primer estudio dio pie a todos los estudios de tamizaje (o “screening”, por su nombre en inglés) actuales dirigidos a detectar tempranamente el cáncer de mama en población asintomática.

En 1965 se desarrolló el Senographe CGR, primer equipo diseñado explícitamente para obtener mamografías. Su creador fue el radiólogo francés Charles Gros, asociado con la empresa Compagnie Générale de Radiologie (ver Figura 6). El tubo de rayos X usaba un ánodo de molibdeno, lo que aseguraba un buen contraste para el tejido gracias a sus líneas características cerca de 20 keV. Se obtenía también una mancha focal de 0.7 mm, lo que garantizaba poca borrosidad geométrica, es decir, buena resolución espacial. Además, se usaba un compresor incorporado que reducía la superposición de tejidos y limitaba el movimiento de la paciente durante la adquisición. A partir de entonces, los avances en el diseño de los equipos han tenido como objetivo la detección de lesiones cada vez más pequeñas y la diferenciación de los diferentes tipos de cáncer en la imagen. Actualmente, la mamografía es la “referencia de oro” para la visualización de lesiones pequeñas y la



Figura 6: Primer modelo comercial del mastógrafo Senographe, producido por la empresa CGR en 1996. Fuente: Foto de M.E. Brandan, General Electric, Buc, Francia.

detección temprana del cáncer de mama. Los avances durante las últimas décadas del Siglo XX permitieron el desarrollo de pantallas intensificadoras de alta sensibilidad que requieren menos rayos X para conseguir una buena imagen en la película. Se obtiene alta resolución espacial pues los tubos tienen manchas focales pequeñas, lo que disminuye la borrosidad, y procesadores de película dedicados a mamografía, que usan temperaturas y químicos optimizados al tipo de película. Sin embargo, el uso de película radiográfica en la llamada mamografía analógica o convencional, presenta limitaciones asociadas a las propiedades de estos receptores de imagen, sobre todo la respuesta no lineal de la película a la radiación incidente, su limitado rango dinámico y el delicado mantenimiento del procesador de película. En el año 2000 se comenzaron a usar receptores de imagen digitales en las unidades de mamografía, reemplazando la película radiográfica por un detector sólido. Éste está generalmente compuesto por una placa de silicio o selenio asociada a una matriz discreta de transistores de pelícu-

la delgada que ofrecen tamaños de pixel entre 50 y 100 micrómetros, más pequeños que el grosor de un cabello. Algunos sistemas digitales detectan directamente los rayos X en el selenio, otros requieren de un material centellador que convierta la energía de los rayos X en luz. Los mastógrafos digitales cuestan unas 5 veces más que un equipo analógico y no han demostrado una mejor capacidad de detección temprana del cáncer, excepto en mujeres pre- y peri-menopáusicas que tienen mamas con una gran presencia de tejido glandular. Para el resto de las pacientes, en especial el grupo mayor de 50 años y en mayor riesgo de cáncer de mama, no hay ventajas entre un sistema y el otro. Sin embargo, el equipo digital ofrece al médico –además de prestigio profesional- ventajas de operación. Desaparece la necesidad del procesador de película, que siempre causa dolores de cabeza por su mantenimiento. Da la posibilidad de transferir y guardar archivos usando medios electrónicos, lo que permite un flujo de pacientes más expedito. Desacopla las etapas de adquisición, visualización y procesamiento de la imagen, abriendo la posibilidad de contar con apoyos de software para la identificación de lesiones difíciles de visualizar.

A casi 20 años del inicio de la era digital en mamografía, la realidad en México es que muchas de las ventajas inherentes al carácter digital de las imágenes se explotan poco. La posibilidad de la telemedicina para el análisis a distancia de imágenes adquiridas en lugares carentes de recursos médicos especializados o el procesamiento digital avanzado, casi no se utiliza. Lo común es que el mastógrafo digital se utilice rutinariamente para obtener imágenes de tamizaje o diagnóstico, más o menos de la misma forma como se usaba previamente el equipo analógico.

Los equipos digitales se pueden clasificar en 2 grupos: los de tecnología digital directa, o de “detector fijo”, que usan un detector anclado al sistema, tal como se describió más arriba, y los de radiografía computada (CR), o de “detector flexible”, que usan una placa fotoestimulable portátil que, después de haber capturado la imagen es trasladada para su lectura y digitalización a un equipo láser de barrido lineal. El costo del CR es sustancialmente menor que un equipo de detector fijo ya que las placas flexibles pueden adaptarse a un mastógrafo convencional. Se ha demostrado que la calidad de la imagen de los sistemas CR es inferior a los de película/pantalla y a los digitales de detector fijo y, en países como Inglaterra, el uso de CR no está autorizado para mamografía de tamizaje; por otro lado, algunos estudios clínicos recientes indican una capacidad similar de visualización y detección de lesiones tempranas si se aumenta la cantidad de radiación empleada. La incorporación de la tecnología digital en los servi-

cios médicos ha sido muy acelerada. De acuerdo con datos actuales de la Secretaría de Salud, existen unos 1500 mastógrafos en los servicios públicos y privados de México y de éstos, 40 % son analógicos, 27 % son CR, y 33 % son digitales de detector fijo, aproximadamente. Las cifras reflejan, por un lado, el gran interés por adquirir equipos digitales, y por otro, la influencia que el costo de la inversión juega a la hora de escoger la tecnología.

LAS TÉCNICAS DEL FUTURO (YA MUY CERCANO...)

La mamografía digital permite el desarrollo de técnicas novedosas que serían imposibles de realizar si se requiriera procesar cada placa radiográfica. Entre las que se encuentran en etapa de desarrollo se encuentra el llamado contraste de fase, en que se mejora la visualización de las interfaces entre tejidos aprovechando las propiedades ondulatorias de los rayos X, además de su atenuación. En el caso de una imagen mamográfica con contraste de fase, el objeto de estudio se ubica a mitad del camino entre la fuente de radiación y el receptor de imagen. El fenómeno óptico de difracción causa que los bordes de los diferentes tejidos se enfaticen por la aparición de franjas intensas, facilitando su visualización. Ya existe un mastógrafo comercial dedicado a esta técnica, pero su validación clínica se considera aún en etapa de desarrollo.

Una técnica totalmente digital que promete aportes de importancia es la resta de imágenes, con el objetivo general de eliminar de la imagen resultante el tejido mamario que dificulta la visualización de un tejido de interés. Por ejemplo, las microcalcificaciones –ya mencionadas como indicadoras de la presencia de un carcinoma precoz– podrían verse más fácilmente si se eliminara de la imagen el tejido glandular sano que las rodea. Las calcificaciones se observan como puntos o manchas de color blanco debido a la alta atenuación causada por estas sales de calcio. El tejido glandular sano también se ve de color blanco, lo que dificulta identificar las sales. En este caso, se ha propuesto la resta de imágenes por energía-dual. En esta técnica se adquieren dos imágenes con diferentes espectros de rayos X y se resta una de la otra, apropiadamente pesada por un factor que hace que el tejido glandular desaparezca. En realidad, el número de pixel correspondiente se hace igual o muy parecido a cero y esto facilita la visualización de la calcificación en la imagen resultante. La idea es muy atractiva, pero se topa con la realidad del pequeño tamaño de las formaciones minerales, lo que dificulta su identificación, incluso en la imagen restada.

El siguiente paso ha sido proponer, conjuntamente con una resta de imá-

genes, el uso de medios de contraste que contienen yodo y que son inyectados por vía intravenosa a la paciente antes o durante el estudio. La resta elimina el fondo estructurado del tejido glandular sano y lo que se enfatiza es la presencia del yodo. El fundamento de esta técnica, conocida como CEDM (contrast-enhanced digital mammography, en inglés), es el proceso de angiogénesis que es la generación de nuevos vasos sanguíneos y linfáticos que aportan nutrientes a las masas tumorales. Estos vasos son inmaduros, imperfectos, y parte del fluido circulante se derrama en la región donde existe angiogénesis. Al identificar el yodo en la imagen restada, se confirma la formación de neo-vasculatura. Ha habido aplicaciones clínicas de esta técnica y nuestro grupo ha desarrollado su propio formalismo de resta de imágenes que optimiza la eliminación del fondo. La Figura 7 ilustra la aplicación de nuestro formalismo en un estudio realizado con pacientes del Instituto Nacional de Cancerología en Ciudad de México; la imagen c) ilustra el énfasis del contraste logrado al restar las imágenes adquiridas con y sin medio de contraste.

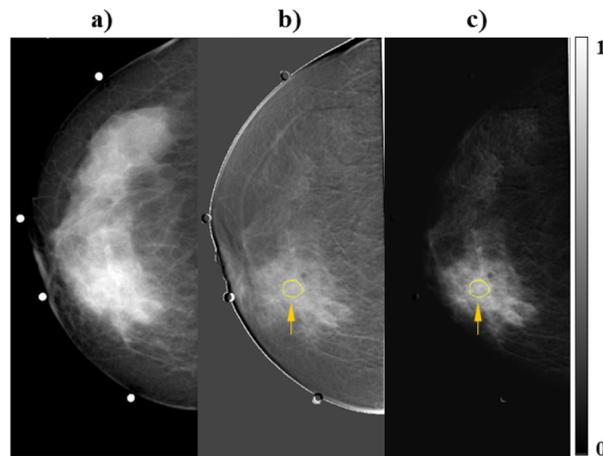


Figura 7: Estudio clínico de la técnica de resta de imágenes con medio de contraste. a) Imagen tomada sin medio de contraste; b) imagen adquirida 3 minutos después de la inyección del medio de contraste; c) resta de las imágenes b) menos a). La flecha indica la localización de la lesión sospechosa. Fuente: J.P. Cruz-Bastida, tesis de Maestría en Ciencias (Física Médica), Posgrado en Ciencias Físicas, UNAM, 2012.

Probablemente el gran avance en la generación de imágenes mamográficas sean las imágenes en tres-dimensiones, obtenidas por un proceso tomográfico similar al usado hoy profusamente en radiología. La técnica, cono-

cida como tomosíntesis y mencionada al final de la sección pasada, consiste en la reconstrucción de proyecciones planas obtenidas al hacer bascular el tubo de rayos X del mastógrafo, que traza un arco alrededor de la vertical, mientras adquiere varias imágenes de baja dosis. La información contenida en estas proyecciones se combina y por medio de un algoritmo de reconstrucción se obtiene una imagen en 3 dimensiones. Ésta se presenta al radiólogo en forma de cortes de algunos milímetros de grosor, donde se puede identificar con gran precisión la presencia y las características de la lesión.

A MODO DE CONCLUSIÓN

Este escrito ha revisado el estado actual de técnicas basadas en rayos X destinadas a obtener imágenes del interior de la glándula mamaria femenina. La mamografía, gracias a su excelente resolución espacial y buen contraste, es el único estudio que ha demostrado ser capaz de reducir la mortalidad por cáncer de mama, gracias a las posibilidades de curación existentes si el cáncer es detectado en su etapa temprana. Existen técnicas diferentes, que usan otras formas de radiación, y que dan información complementaria que puede ser valiosa para el radiólogo. La más usada es el ultrasonido, que sirve para evaluar la posible malignidad de masas identificadas previamente por una mamografía. Tiene, sin embargo, una resolución espacial tan limitada que no podría brindar un diagnóstico temprano. La resonancia magnética es una opción de alta calidad de imagen para casos en que la radiación asociada a la mamografía se quiera evitar totalmente. La imagenología por resonancia magnética es menos específica que la mamografía y su gran desventaja es el costo. La termografía identifica cambios de temperatura en la piel como indicadores de un tumor interno; no existen estudios clínicos que confirmen su capacidad de detectar cáncer de mama ni de disminuir la mortalidad. La tomografía fotoacústica es una técnica que se encuentra aún en etapa de desarrollo y validación. Se basa en la excitación luminosa de la hemoglobina presente en mayores niveles en tumores que en tejidos sanos. La absorción lumínica de pulsos cortos de luz láser es seguida por una expansión térmica que genera ondas de ultrasonido. Éstas se detectan y se reconstruye una imagen tri-dimensional de la vascularización del tejido. Las técnicas alternativas mencionadas puede ofrecer información adicional a la anatómica brindada por la mamografía. Podemos concluir que el desafío de observar el interior del cuerpo ha sido plenamente superado y los nuevos desarrollos seguirán sorprendiéndonos con el ingenio del avance tecnológico y la calidad e información contenida

en sus imágenes.

AGRADECIMIENTO

La elaboración de este documento fue posible gracias al apoyo parcial de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, DGAPA, a través del proyecto PAPIIT IN107916.

BIBLIOGRAFÍA

Dibner B. *The new rays of Professor Röntgen*, Burndy Library, Norwalk, (1963).

Bourne R. *Fundamentals of Digital Imaging in Medicine*, Springer-Verlag, London, (2010).

Bakic P.R. y Gavenonis S. (eds.) *Breast Imaging*, ADA Maidment, 11th International Workshop, IWDM, LNCS 7361, Proceedings, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (2012).

Bick U. y Diekmann F. (eds.), *Digital Mammography in Medical Radiology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (2010).

Brandan M.E. *Contrast-enhanced digital mammography and other techniques based on image subtraction*, En: AIP Conference Proceedings 1747, MEDICAL PHYSICS: Fourteenth Mexican Symposium on Medical Physics, Massillon-JL G., Fossion R., Rosado Méndez I.M., Ávila-Rodríguez M.A. and López-Pérez D.O. (eds.), Mexico City, (2016).

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

EL NÚCLEO ATÓMICO EN EL SIGLO XXI
100° ANIVERSARIO DEL DESCUBRIMIENTO DE RUTHERFORD DEL
NÚCLEO ATÓMICO

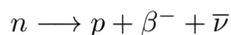
*Efraín R. Chávez Lomelí**

LA investigación presente y futura en Física Nuclear desde el punto de vista experimental es consecuencia de décadas de pequeños y grandes desarrollos. Nuevas tecnologías, procedimientos e ingenio han sido necesarios a lo largo de la historia para llevar los experimentos a un asombroso nivel de sofisticación y refinamiento en todos y cada detalle, convirtiendo en realidad medidas que hubieran sido consideradas como fantasía hace sólo unas décadas incluso por los científicos más osados.

El desarrollo de nueva instrumentación es el elemento clave para pavimentar el camino del descubrimiento científico: neutrones cada vez más fríos, trampas atómicas, haces radioactivos, electrónica rápida y compacta, detectores con alta resolución y cobertura angular, etcétera.

Incógnitas que quedan por resolver en esta área inician con los componentes elementales mismos del núcleo: el protón y el neutrón. Desde que la existencia del neutrón fue confirmada por J. Chadwick en 1932 se ha aceptado que el núcleo atómico está constituido por protones y neutrones.

Aparte de su carga eléctrica, protones (el barión más ligero) y neutrones son muy similares y son llamados genéricamente “nucleones”. El neutrón (n) puede de hecho ser considerado como un protón (p) en un estado excitado inestable que decae a su estado base con una vida media cercana a los 15 minutos, emitiendo un electrón (β^-) y un antineutrino ($\bar{\nu}$), el mismo proceso que ocurre en los decaimientos “beta menos”.



Cabe aquí una precisión: en la naturaleza hay cuatro interacciones fundamentales conocidas: la interacción fuerte (o nuclear), la débil, la electromagnética y la gravitacional. A las partículas que sienten la interacción

* Departamento de Física Nuclear y Aplicaciones de la Radiación, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

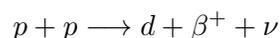
fuerte se les conoce como Hadrones (“Bariones” los pesados y “Mesones” los ligeros). Hay otras partículas (Leptones) que interactúan mediante la interacción débil. Las partículas con carga eléctrica o momentos eléctricos o magnéticos sienten la interacción electromagnética. La interacción gravitacional la sienten todas aquellas con masa diferente de cero.

Como la vida media del protón es tan larga, incluso mucho mayor que la edad misma del universo ($>10^{29}$ años, suponiendo que el número bariónico no se conserva), para fines prácticos lo consideramos estable. Desde el punto de vista de la estructura nuclear, el protón y el neutrón son los isóbaros estable y radioactivo respectivamente para $A = 1$, donde A representa la suma de protones y neutrones en un núcleo.

Los neutrones están llenos de problemas sin resolver, aquí mencionaremos únicamente dos. Primeramente, su vida media de cerca de 15 minutos no ha sido medida con precisión satisfactoria. Realizar medidas de tiempo con precisiones mejores a un microsegundo es hoy común, incluso en prácticas de laboratorio de nivel medio superior, mientras que la precisión reportada (hasta el 2010) para la vida media del neutrón es de casi un segundo entero ($885,7 \pm 0,8s$), únicamente una parte por millar. ¿Es posible mejorar este nivel de precisión en el siglo XXI? Se trata obviamente de un área de oportunidad para realizar una aportación significativa en el tema mediante el desarrollo de nuevas ideas, procedimientos e instrumentación.

Actualmente los principales esfuerzos en esta dirección se están llevando a cabo produciendo neutrones cada vez más lentos, mil veces más lentos que los neutrones térmicos producidos en los reactores nucleares, con velocidades de orden de unos metros por segundo únicamente, lo que está abriendo nuevas oportunidades para el descubrimiento científico.

El segundo aspecto relacionado con los neutrones que quiero mencionar aquí tiene que ver con el entendimiento incompleto de la interacción débil que no sólo es importante para tener una descripción coherente del decaimiento del neutrón libre, sino para entender la reacción nuclear que ocurre con mayor frecuencia en el universo: la que inicia la secuencia principal en la combustión del Hidrógeno en todas las estrellas. A saber la producción de deuterio (d) a partir de la colisión de dos protones (p):



Aquí para conservar la carga, es necesaria la emisión de un positrón (β^+ , la partícula antimateria del electrón con carga positiva). Otra ley de conservación (el número total de Leptones) obliga la emisión de un neutrino adi-

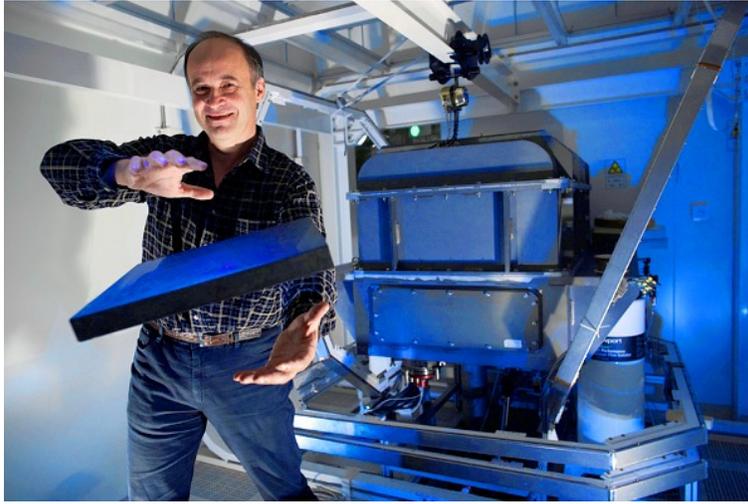


Figura 1: El Dr. Valery Nesvizhevsky al lado del espectrómetro “GRANIT” desarrollado para trabajar con neutrones ultra fríos levitados sobre un espejo para estudiar campos gravitacionales y centrífugos. El laboratorio está ubicado en el reactor nuclear de 58 MW del Institute Laue Langevin en Grenoble, Francia. Cortesía del Dr. Nesvizhevsky.

cional. Prueba de que esta reacción entre partículas que normalmente usan la interacción fuerte, ocurre mediante la interacción débil.

Estudios sobre este problema fundamental en física se llevan a cabo en los mejores laboratorios del mundo, por ejemplo, a través de la inspección detallada de la violación de la simetría para la emisión de fotones (γ) en colisiones de neutrones fríos polarizados con blancos líquidos de Hidrógeno, igualmente polarizados.



El “Institute Max von Laue - Paul Langevin” (ILL) de Grenoble, Francia, con su reactor de investigación de 58 MW y su extenso equipo de laboratorio asociado, tiene que ser mencionado como uno de los principales centros de investigación en el mundo productores de flujos de neutrones lentos, fríos, muy fríos y ultra fríos para la investigación experimental en física. Para profundizar en este tema, recomiendo comenzar con la lectura de los trabajos de Valery Nesvizhevsky.

El laboratorio nacional de Oak Ridge, en Tennessee Estados Unidos, ha asegurado a futuro un papel preponderante a nivel mundial al reunir la



Figura 2: En la foto, la Dra. Libertad Barrón Palos, en el área experimental del Spallation Neutron Source (SNS) del Oak Ridge National Laboratory, en donde corre el experimento “npdgamma”. Fotografía cortesía de Jaime Fernández Baca.

fuentes de neutrones más brillante actualmente disponible en el mundo: la “Spallation Neutron Source”, una fuente pulsada de 2 MW y el “High Flux Isotope Reactor” de 85 MW, recientemente convertido en celebridad mundial por el descubrimiento del elemento 117 en una colaboración Rusia-EU (Dubna-ORNL).

Los núcleos de los elementos más pesados son agregados de protones y neutrones. A la propagación de las incertidumbres asociadas con el entendimiento de cada uno de sus componentes, se agrega el desconocimiento preciso de las interacciones fuerte y débil, así como el tratamiento matemático de sistemas de muchos cuerpos (3 o más). De esta manera resulta natural esperar que el núcleo atómico se mantenga como una de las principales fuentes de problemas sin respuesta que quedan en la física moderna.

MASA Y TAMAÑO

Por definición la masa del átomo de ^{12}C es de 12 unidades de masa atómica (uma). Así, la masa de cualquier núcleo es “aproximadamente” igual al número de nucleones que lo integran, en uma. La diferencia entre la masa observada y la suma de las masas de sus componentes se conoce como “energía de ligadura” y ha sido fenomenológicamente “entendida”

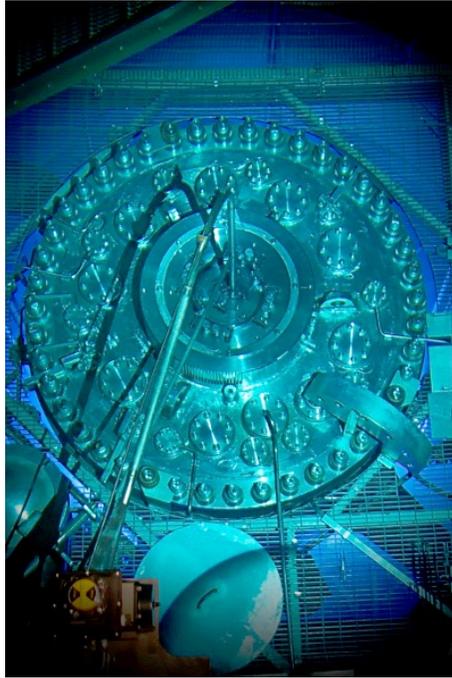


Figura 3: En la foto se aprecia la tapa superior del reactor de 58 MW “High Flux Isotope Reactor” (HFIR), del Oak Ridge National Laboratory. En su corazón es dónde se producen los isótopos radioactivos para todo tipo de aplicación. Fotografía cortesía de Joulie Ezold del ORNL.

mediante el modelo de la gota líquida y la fórmula de masas propuesta por Carl Friedrich Freiherr von Weizsäcker desde 1935.

Por décadas se ha venido midiendo cada vez con mayor precisión la masa de todos los núcleos conocidos, principalmente mediante el uso de campos magnéticos (espectrómetros de masa y la medida de la frecuencia de resonancia de ciclotrón), lo que ha demostrado la limitación del modelo de la gota líquida. Algunas de las desviaciones más importantes a dicha aproximación fenomenológica provienen de efectos cuánticos (estructura nuclear: capas) y existen en la actualidad modelos matemáticos que incluyen este tipo de correcciones. Sin embargo las medidas de las masas, son ya tan precisas que constituyen un reto para todo cálculo teórico existente. Todavía no contamos con un modelo, y mucho menos una teoría, que reproduzca con precisión todas las masas conocidas y pueda predecir razonablemente la masa de núcleos para los que no se tiene medida. Físicos

teóricos mexicanos han trabajado en el tema y hecho aportaciones significativas en el camino de entender e incluso llegar a predecir el valor de la masa de un núcleo atómico.

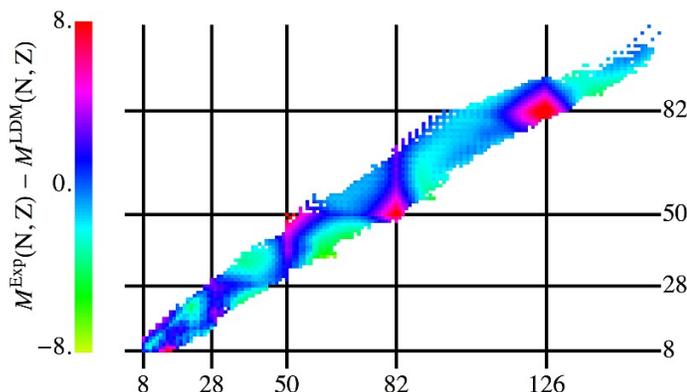


Figura 4: Es una “carta nuclear”. En el eje horizontal se grafica el número de neutrones que tiene un núcleo y en el vertical el de protones. Cada punto representa a un núcleo con coordenadas (N, Z). El código de color se muestra a la izquierda y representa la diferencia entre la masa medida de cada núcleo y la calculada con el modelo de la gota líquida. Cortesía del Dr. Irving Morales.

En cuanto al tamaño, desde los pioneros trabajos de Ernest Rutherford hace un siglo (publicados en 1911 y 1919), aprendimos que el núcleo es mucho más pequeño que el átomo mismo. Y sin embargo la medida precisa de su radio sigue siendo objeto de investigación y fuente de descubrimientos novedosos. Experimentos recientes con electrones de alta energía, neutrones rápidos así como con núcleos radioactivos demuestran una y otra vez lo limitado de nuestro entendimiento en el tema.

Una parte significativa del problema proviene justamente de nuestras limitaciones para trabajar en escalas subnanométricas (¡fantométricas!). Así, mientras sus masas pueden ser medidas con precisión de una parte en un millón o mejor, su radio sólo ha podido ser determinado, en el mejor de los casos (el radio del protón), con una precisión cercana a sólo una parte en cien.

Nuevas tecnologías y protocolos siguen apareciendo para mejorar la precisión en la medida del radio nuclear. A pesar de los impresionantes esfuerzos en el área, el avance es lento y difícil. La medida del tamaño del núcleo y la distribución de densidad, seguirá siendo un tema activo de investigación en el mundo de la física nuclear, y los avances seguirán llegando

conforme se mejore la precisión en los datos. El uso de sondas electro débiles (electrones) de longitud de onda muy pequeña es una posibilidad reciente. Para profundizar en este tema, recomiendo un vistazo a los experimentos en curso en el laboratorio "Thomas Jefferson National Accelerator" de los Estados Unidos.

Tamaños y densidades nucleares requieren de una sonda nuclear con tamaño bien definido y sin interferencia electro débil. Lo más cercano a ello son los neutrones rápidos. Un esfuerzo mexicano reciente demuestra las dificultades inherentes a vencer con la medida del radio de un núcleo de plomo con neutrones rápidos monocromáticos.

Ya hace años que el radio de carga nuclear se ha medido (deducido) a partir del desdoblamiento hiperfino de niveles electrónicos en campos magnéticos, demostrando que la receta tradicional $R = R_0 A^{1/3}$, donde el volumen del núcleo es proporcional al número total de nucleones (como el tamaño de una bolsa de canicas es proporcional al número de canicas), es una aproximación que puede fallar por mucho. Recientemente esta técnica ha sido aplicada para deducir el radio de carga de núcleos muy ricos en neutrones, mostrando que dicho radio DECRECE conforme aumentamos el número de nucleones para los isótopos de Litio (${}^{6,7,8,9,11}\text{Li}$). Comportamiento que no ha podido ser explicado con base en cálculos con los modelos existentes. Particularmente con el modelo de capas.

Considerando a los núcleos fuera del valle de estabilidad (es decir, núcleos inestables, con exceso de protones o neutrones) como núcleos en estados excitados que decaen a configuraciones más estables, los ejemplos anteriores indican que es necesario entender la dependencia del radio nuclear como función de la energía de excitación. La mayoría de los estados excitados nucleares tienen vida media muy corta, lo que torna su estudio muy difícil. Sin embargo hay algunos de ellos con vida media suficientemente larga como para realizar una medida directa de su radio como sería el caso del primer estado excitado en ${}^{10}\text{B}$, tal como se ha propuesto medir en el Instituto de Física de la UNAM.

Además de la carga, masa, tamaño y forma del núcleo, también podemos preguntarnos acerca de su dinámica: ¿se comportan como sólidos, líquidos? ¿Interactúan al contacto o a cierta distancia? ¿Cómo se manifiesta en su dinámica las restricciones cuánticas?

El descubrimiento del núcleo atómico vino como consecuencia del entendimiento alcanzado a principios del siglo pasado en la forma en la que dos partículas cargadas se dispersan mutuamente por efecto de la interacción electromagnética. Así fue que se pudo determinar que el radio del nú-

cleo era cuatro órdenes de magnitud menor que el del átomo, conteniendo la gran mayoría de su masa.

Éste es uno de los mejores ejemplos de la importancia de contar con un buen entendimiento de la dinámica de interacción entre el proyectil y el blanco para poder extraer información adicional, por ejemplo sobre la estructura interna de los núcleos en colisión.

Así se han ido clasificando diversos tipos de mecanismos de reacción observados en colisiones nucleares: "Rutherford Scattering" (elástica puramente electromagnética) Dispersión elástica (incluye efectos de la fuerza nuclear) Dispersión Inelástica (alguno de los núcleos participantes emerge de la colisión en un estado excitado). Reacciones de transferencia de nucleones. Reacciones de Fusión o captura, etcétera. Que describen la forma en que interaccionan el proyectil y el blanco nucleares. Debido a que luego de la colisión, los productos de la reacción pueden encontrarse en estados inestables (excitados), para entender el comportamiento de las partículas finalmente detectadas es necesario describir el proceso de desexcitación nuclear. De esta manera la descripción de un mecanismo de reacción completo requiere de dos partes comúnmente llamados "canal de entrada" y "canal de salida". Mientras mejor se conozca el mecanismo mediante el cual ocurre una reacción nuclear, de mejor calidad será la información adicional que podamos obtener acerca de nuestro sujeto de estudio: el núcleo atómico. Veremos a continuación algunos ejemplos.

REACCIÓN NUCLEAR DE FUSIÓN

Canal de entrada: la probabilidad de que ocurra la fusión de dos núcleos estables como función de la energía cinética relativa entre ambos presenta un comportamiento que puede describirse fácilmente como el resultado de la colisión de dos esferas cargadas. A energías superiores a la de repulsión electrostática clásica, la probabilidad de que ocurra la fusión es aproximadamente constante, y si normalizamos con el tamaño de los participantes, es aproximadamente igual en todos los casos.

Podemos decir que la estructura interna de los núcleos participantes juega un papel insignificante en la probabilidad de que ocurra la fusión nuclear. Para energías menores, la fusión ocurre únicamente como resultado del efecto túnel cuántico (penetración de barrera) y la probabilidad decae exponencialmente. Es ahí donde los efectos de estructura nuclear aparecen ocasionando variaciones importantes en la magnitud de la probabilidad de fusión (resonancias), lo que se ha constituido en una ventana para explorar

detalles de la estructura de núcleos exóticos.

Canal de salida: el núcleo formado luego de la fusión del proyectil con el blanco (conocido como núcleo compuesto) se encuentra en un estado excitado que va a transitar hacia estados de menor energía mediante un procedimiento conocido como “Decaimiento Nuclear”.

La radioactividad fue descubierta incluso antes del nacimiento de la física nuclear como la entendemos hoy. Sin entender bien su naturaleza los científicos de la época encontraron tres tipos distintos de radiaciones y las clasificaron como alfa, beta y gama. Hoy sabemos que todo núcleo atómico se encuentra en un estado bien definido (cuántico) y si existe un estado de menor energía, inevitablemente transitará hacia él. Dicha transición puede implicar la emisión de radiación electromagnética (rayos gama) o la emisión de partículas. Además de las originalmente descubiertas (alfa y beta), se ha encontrado un amplio y rico conjunto de posibilidades de decaimiento por emisión de nucleones (protones y neutrones) o cúmulos de nucleones (^{14}C , ^{18}O , ^{22}Ne , etcétera) que pueden llegar hasta la fisión nuclear simétrica.

Una de las formas de decaimiento más raras y difíciles de encontrar es la de la emisión simultánea de dos protones. Una colaboración internacional (Oak Ridge National Laboratory-IFUNAM) encontró el primer estado nuclear (un estado excitado en ^{18}Ne) que decae de esa forma. El caso del decaimiento simétrico (emisión simultánea de dos neutrones), es también sujeto actual de intensa búsqueda.



Figura 5: En la imagen, el Dr. Anthony Mendez en la plataforma de alto voltaje que separa los iones radioactivos producidos por el ciclotrón isócrono y los inyecta al acelerador electrostático más grande del mundo en el Holifield Radioactive Ion Beam Facility, del Oak Ridge National Laboratory en Tennessee Estados Unidos. Cortesía del Dr. Anthony Mendez.

El entendimiento de la estructura interna del núcleo presenta un reto formidable que mantiene actualidad. La capacidad predictiva de nuestros mejores modelos sigue siendo bastante pobre. El modelo de capas proviene de la idea de modelar al núcleo como un conjunto de protones y neutrones contenidos en un volumen finito sin interactuar entre sí. Como un gas ideal de fermiones. Debido a su simplicidad, resultó sorprendente el éxito obtenido con este modelo para reproducir muchas características nucleares no entendidas hasta el momento en que se propuso (números mágicos, espín y paridad de los estados base y primeros excitados nucleares). Sin embargo, como todo modelo, tiene sus limitaciones. No se aplica de la misma manera a todo núcleo y tiene que ser ajustado frecuentemente para reproducir la nueva evidencia experimental que va surgiendo. A pesar de todo, sigue siendo el principal pilar con el que contamos para entender la estructura nuclear.

No es el único modelo propuesto. La existencia de cúmulos (granos) de nucleones dentro del núcleo mismo, fue sugerida como uno de los primeros modelos para explicar la estructura interna de los núcleos. Tan temprano como 1938, motivados por la radioactividad alfa, Hafstad y Teller propusieron el modelo de cúmulos alfa de los núcleos. En 1980 A. Sandulescu, basado en el balance de energía, propone la existencia de radioactividad natural mediante la emisión de núcleos más pesados que las partículas alfa. En 1984 Rose y colaboradores encontraron la primera evidencia de dicho decaimiento detectando núcleos de ^{14}C , un siglo después del descubrimiento de la radioactividad natural por Beckerel en 1896.

A pesar de las grandes incógnitas que siguen esperando respuesta, como las arriba mencionadas, lo aprendido hasta ahora sobre el núcleo atómico ha permitido el desarrollo de diversas aplicaciones: de la generación de energía a la medicina, por citar las más conocidas, pero también este conocimiento ha contribuido al desarrollo de otras áreas de investigación científica.

Astronomía: Uno de los trabajos más relevantes en este contexto (conocido como "B2FH") mostró que todos los elementos de Carbono a Uranio, pueden formarse dentro de las estrellas a partir del Hidrógeno y Helio cosmogénicos (producto de la gran explosión origen del universo). Junto con el trabajo de Al Cameron (1957) nace el concepto de nucleosíntesis estelar dentro del mundo de la astrofísica (también conocida como astrofísica nuclear).

Resolviendo un conjunto relativamente grande de ecuaciones diferenciales acopladas (network calculations), es posible hoy hacer comparacio-

nes cuantitativas entre la teoría y los datos experimentales. El conocimiento de la probabilidad relativa de ocurrencia de miles de reacciones nucleares en extensos intervalos de energías es requerido. La mayoría de los valores introducidos en los cálculos son resultado de extrapolaciones teóricas a datos incompletos. Los sistemas para los que se tienen datos experimentales completos y confiables son la excepción y se cuentan con los dedos de una mano.

¿Por qué? El valor absoluto de las probabilidades (secciones eficaces) que se tienen que medir es muy pequeño. Lo que torna cada experimento en un proyecto complejo, largo y costoso. A guisa de ejemplo, el estudio del sistema $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ tomó a nuestro grupo cuatro años y requirió de una inversión sin precedente.

El estudio de otros sistemas se encuentra en la gran mayoría de los casos, en peor situación, es decir, con datos experimentales de menor calidad. El campo de la astrofísica nuclear se ha convertido en un motor para el desarrollo de la física nuclear misma, tanto desde el punto de vista experimental como teórico.



Figura 6: El área experimental del Laboratorio Carlos Graef Fernández del Instituto de Física, potenciado por un acelerador tipo Van de Graaff de $5,5\text{MeV}$. En la imagen sentado en la computadora el Fis. Arcadio Huerta y de derecha a izquierda de pie: J. Fco. Favela, Cristobal M. García J. y Efraín R. Chávez L. A su espalda se aprecia en naranja el imán selector de energía del acelerador y a la izquierda la línea del blanco gaseoso sin ventanas (jet supersónico).

Otra aplicación consecuencia del conocimiento acumulado sobre el núcleo tiene que ver con el estudio de la materia. Todo en la tierra contiene núcleos radioactivos en alguna proporción que puede ser minúscula (una parte en 10^{12} o incluso menos). Con el desarrollo de técnicas analíticas tan sofisticadas como la Espectrometría de Masas asistida por Aceleradores de partículas, es hoy posible medir esas concentraciones. La aplicación sin duda más conocida tiene que ver con el fechamiento de objetos orgánicos históricos o prehistóricos utilizando ^{14}C . Debido a que la vida media de este isótopo es de pequeña (menos de 6000 años) esta técnica funciona para objetos cuya antigüedad no excede los 60 mil años.



Figura 7: El LEMA (Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores) del Instituto de Física de la UNAM, capaz de medir concentraciones de algunos isótopos radioactivos en la materia (^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{129}I y $^{239,240,242}\text{Pu}$) con una precisión de una parte en 10^{15} .

La medida de la concentración de éste y otros isótopos radioactivos en materiales ha encontrado uso y aplicación en prácticamente todos los campos de investigación y desarrollo tecnológico. De la medicina a la geología.

LECCIONES DE LOS EXPERIMENTOS DEL SIGLO XXI

*Gerardo García Naumis**

HACE 120 años era difícil concebir un mundo conectado por máquinas voladoras, comunicaciones instantáneas de imagen a nivel mundial, una biblioteca universal (internet), o el acceso instantáneo a un mapa universal (Google earth) con nuestras coordenadas (GPS) obtenidas en vivo, así como sondas espaciales en otros planetas. De hecho, cuando nació mi abuela ni apenas existían los automóviles. Había sólo caballos. Tampoco televisión ni aviones, mucho menos internet. Con el tiempo, a ella le tocó viajar en avión, presenciar por televisión la llegada del hombre a la Luna y hasta mandar correos electrónicos. Todo esto en el transcurso de una vida; diríamos de hecho que fué una vida de cambios. Aunque el cambio fue muy acelerado, muchas de las ideas estaban allí desde tiempos remotos. ¿Desde cuándo quisimos volar o saber de qué está hecha la Luna? La lección de lo anterior es simple. El futuro es difícil de predecir, pero para saber algo de él debemos contestarnos ¿Qué cosas queremos hacer o saber que hoy nos parezcan imposibles? ¿No sería lindo podernos tele-transportar o ponerle una memoria USB al cerebro para tener recuerdos de lugares que nunca hemos visitado? O aprender a tocar el piano subiendo un módulo experto al cerebro. ¿Qué tal tener una computadora delgada como un papel que se cargue con el Sol y que sea 300 veces más rápida que las actuales? O coches que gasten mucho menos combustible y de preferencia sin contaminar. ¿Podremos vivir 1000 años? Sin duda, esto facilitaría los viajes espaciales y podría darme tiempo para aprender a jugar ajedrez bien de una buena vez. Las respuestas a estos deseos sin duda pasan por la ciencia experimental. La razón es que la tecnología requiere de la ciencia y ésta necesita del experimento. No hay mejor juez que la naturaleza, dijo el gran Leonardo Da Vinci.

Así, en mi opinión las visiones de la ciencia experimental pasan por nuestros deseos, necesidades y fantasías. Conectémonos pues con ellas. Las

* Departamento de Sistemas Complejos, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

respuestas a nuestras visiones tienen dos vertientes. La primera es dilucidar qué temas serán los más relevantes en base a nuestros sueños, y la segunda, qué técnicas, aparatos y maneras de colaborar existirán para llevarlos a cabo. Por ejemplo, de las preguntas que formulamos en los primeros párrafos, es claro que muchas de ellas tienen que ver con el cerebro. Es sumamente curioso saber que si bien el escritor de este texto usa su cerebro para escribirlo (o al menos así lo cree él), los mecanismos de cómo recuerda las palabras, las imágenes que evocan y cómo las asocia son realmente un misterio. Sabemos que tenemos neuronas así como la fisiología de estas, sabemos la anatomía del cerebro, pero en sí, entendemos muy poco de cómo funcionan todos estos circuitos para poder reconocer a una persona, asociarla o buscar recuerdos. De este modo, una de las fronteras del conocimiento está sobre nuestros hombros. Este ejemplo da otra pista sobre la otra vertiente que debemos considerar, es decir, cómo debemos buscar estas respuestas.

En primer lugar, si sólo consideramos la parte anatómica y fisiológica, necesitaríamos buenos investigadores en medicina, bioquímica, biología. Para entender cómo se orquestan estas partes, se necesitan procedimientos que permitan entender cómo se forman las imágenes, pensamientos, palabras. Aquí resultaría muy valiosa la física de los sistemas complejos, la lingüística, la psicología, etc. Como vemos, debe ser un enfoque multidisciplinario con expertos en diversos temas. Sería altamente improbable que en un solo país existieran expertos en todas estas áreas enfocados en el mismo tema, por lo cual el grupo tendrá que ser internacional.

Finalmente, deberán desarrollarse instrumentos, para ello se requiere de ingenieros, físicos, matemáticos. El ejemplo más claro es la tomografía o resonancia nuclear. Gracias a ella se puede ver el interior de un cuerpo sin abrirlo. También se pueden ver qué partes del cerebro están activas al leer, reconocer una cara, escuchar música. El desarrollo de estas técnicas es un claro ejemplo de cómo la física, la matemática y la ingeniería permitieron un nuevo instrumento que ha develado aspectos muy importantes del cerebro. Podemos imaginar entonces dispositivos como interfases microscópicas entre cerebro y computadora que permitan obtener muchos más detalles de la actividad eléctrica local del cerebro. Estas interfases podrían ser de grafeno, material descubierto en el 2004 y que podría llevar a una revolución en la electrónica que hermane a los humanos y computadoras. Déjenme hablarles un poco del grafeno, la nueva estrella del “mundo material”. El descubrimiento del grafeno en el 2004 ha significado un partaguas en cuanto a las posibilidades de los nuevos materiales. Lo más sorprendente es que se obtuvo pegando y despegando grafito, que es el material negro

usado en las puntas de los lápices, con una cinta adhesiva. Este material es el más delgado del mundo. Está formado por una sola capa de átomos de carbono, dispuestos en una red similar a la estructura de los panales de abeja (Figura 1). Este nuevo material es mil veces más resistente que el acero pero es flexible y ultraligero. La corriente eléctrica se propaga casi sin resistencia y, por lo tanto, se disipa poco calor. Aun más, los electrones viajan en el grafeno como si fueran partículas cuánticas relativistas, lo cual permite emular fenómenos que se pensaba podrían observarse sólo en grandes aceleradores.

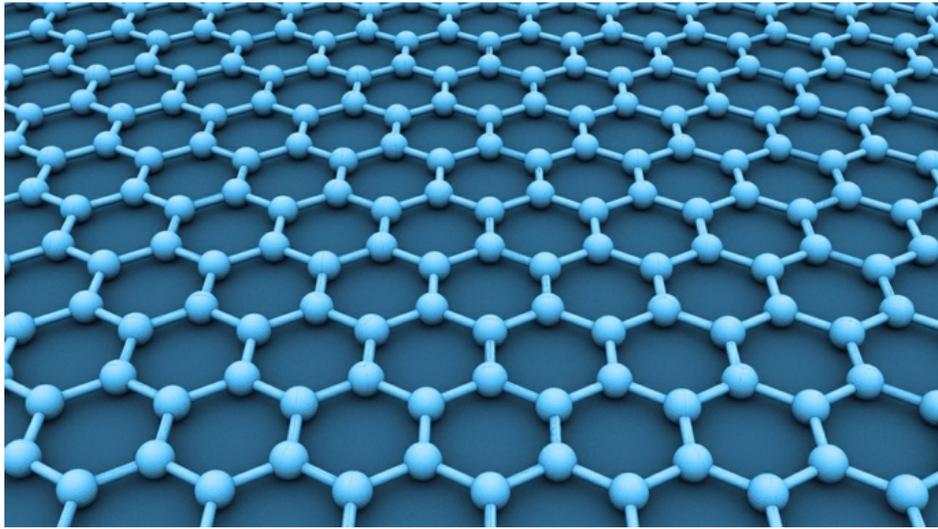


Figura 1: Estructura atómica del grafeno. Se trata de una lámina con un espesor del tamaño de un átomo. Los átomos de Carbono están dispuestos siguiendo una estructura similar a la de un panal de abeja.

¿Qué queremos decir por cuántica relativista? La mecánica cuántica estudia al mundo de lo muy pequeño; es decir, cosas del tamaño o más chicas que los átomos. La relatividad, que todos sabemos se la debemos a Albert Einstein, estudia el mundo de las grandes velocidades, asociado generalmente a tamaños grandes como soles, galaxias, hoyos negros. Pero si tomamos una partícula muy chica, como un electrón, y la aceleramos mucho, tendremos una partícula chica que viaja muy rápida. Para describirla necesitamos entonces mezclar los dos ingredientes, cuántica con relatividad. Normalmente, las grandes velocidades necesarias sólo pueden obtenerse con máquinas muy grandes, algunas miden kilómetros de distancia. Aquí hay un mundo nuevo que se revela con fenómenos inusuales. Uno de ellos

es el efecto Klein, el cual consiste en que ya encarrerada, la partícula no puede ser detenida, es decir, si interponemos materia a la partícula, ésta la puede atravesar sin ningún problema. En otras palabras, son casi imparables. El efecto Klein ha podido observarse en laboratorios muy sencillos usando grafeno. De este modo, podemos darle la vuelta al tener que usar máquinas enormes.

El futuro es muchas veces impredecible porque el azar juega un papel importante. Así, en febrero del 2013, unos investigadores tuvieron un accidente muy feliz en el laboratorio. Después de un derramamiento accidental de grafeno diluido con agua sobre un DVD, esperaron a que éste se secase. Decidieron grabar unas pistas con un patrón predeterminado usando un quemador de CD. ¿El resultado? Bueno, pues un efecto que probablemente cambiará al mundo. Este DVD con grafeno resultó ser una especie de superbatería. ¿Qué quiere decir esto? Hablemos primero de las baterías normales. Como todos sabemos, tenemos que esperar un buen rato para cargar nuestros celulares, tabletas, computadoras portátiles, cámaras digitales. Además, las baterías usadas en la actualidad contaminan de una manera importante al agua, la atmósfera y la tierra. Por otra parte, duran poco. Estos problemas limitan notablemente el éxito de los coches o camiones eléctricos. Para cargar un coche de este tipo, se debe dejarlo conectado a la red eléctrica toda la noche. ¿Qué tal tener un celular o cámara que se cargue en 2 o 3 segundos pero que dure 10 veces más que en los modelos actuales? Más aún, sería deseable que estas baterías fueran mucho más livianas, flexibles y que una vez terminada su vida útil, en lugar de llevarla a lugares especiales de confinamiento, pudieran ser usadas como abono de jardín. Precisamente estas son las cualidades de las superbaterías desarrolladas con grafeno. Con una carga rápida de 2 o 3 segundos, la batería se cargó completamente, con una energía suficiente para mucho tiempo. Como el grafeno es simplemente carbón, éste puede ser desechado y usado como abono del jardín.

Las aplicaciones de este descubrimiento son notables. Por primera vez permitirían el uso de coches y camiones eléctricos, o se podrá integrar a las baterías con celdas solares para guardar la carga del Sol. Más aun, las baterías son flexibles y delgadas, por lo cual podrían usarse sobre la ropa para cargar los celulares, o en computadoras flexibles. El peso de estas superbaterías es mucho menor que en los actuales sistemas y desde luego que podrían usarse en prótesis biónicas o marcapasos. Estas baterías, por ser flexibles, podrían integrarse a la computadora también flexible de grafeno y por primera vez acercarnos al sueño de una computadora en una hoja. Lo

sorprendente de todo esto, es que el descubrimiento necesitó sólo de aparatos caseros, es decir, unos DVD, grafito, quemadores de DVD y algunos elementos químicos. Esto muestra el papel determinante del laboratorio, dado que los accidentes fortuitos pueden ser la chispa para crear un dispositivo que cambie al mundo. Aquí juega un papel no sólo el hecho de experimentar, sino también el instinto científico de la persona en el laboratorio. El que sabe ver siempre será el que encuentre, aun con un laboratorio muy básico.

Uno de los aportes de la investigación en grafeno, considerado como uno de los diez temas de investigación con mayor importancia en la ciencia y tecnología, es que justamente se ha realizado en gran parte de “manera casera”. Esto indica una tendencia que se ha venido confirmando a lo largo de los últimos años: la existencia de pequeños laboratorios que ofrecen grandes resultados. A modo de ejemplo, podemos citar los experimentos en medios granulares. Si, medios granulares. ¿Qué son estos? Básicamente son materiales formados por pequeños granos, como la arena o el maíz a granel. Podría pensarse que este tema no es relevante; sin embargo, resulta fundamental en la industria alimentaria, en la estabilidad de suelos, formación de terremotos o avalanchas. Cuando uno visita esos laboratorios, sorprende la sencillez de los equipos, pues sólo usan cámaras, reglas, algunas veces bocinas y eso sí, muchos granos y pelotas de diferentes tamaños.



Figura 2: Estados atascados de dulces en el mercado de San Angel, Ciudad de México. Su estudio permite entender la estructura y el comportamiento de medios granulares, congestiones de tráfico automotriz e informático, así como de materiales. Las propiedades de algunos de estos apilamientos son desconocidas ¡Aún en el mercado hay espacio para la ciencia de frontera! (Foto del autor).

A manera de ejemplo, en la figura 2 podemos ver diversos apilamientos de dulces. Es notable la formación de patrones geométricos muy interesantes. De hecho, muchas de las propiedades de cómo quedan atorados los dulces dependiendo de su forma, es un tema de investigación de frontera. Un estudio de cómo se empaquetan los chocolates de forma ovalada, indicó

propiedades inesperadas respecto a lo observado con esferas. Estas fotografías muestran que aún en el mercado de San Angel, hay lugar para la ciencia de frontera si el observador está atento. ¿Y por qué la importancia de estos apilamientos? Los granos de arena, café, semillas o sal no se comportan ni como sólidos ni como líquidos. Es más, presentan características que desafían a la física tradicional. Uno podría pensar que los granos fluyen como un líquido, pero momento, ¿cuándo hemos visto que pongamos de cabeza una botella y que no se salga el agua? Bueno, pues si reflexionamos, eso pasa con los saleros y otros medios de contención de granos. Muchas veces debemos golpear el frasco para “desatorar” la sal. De hecho, si queremos homogeneizar un líquido, como un jugo de naranja o una lata de pintura, debemos agitarlo. Si hacemos eso con granos, el resultado es el contrario al esperado, es decir, al agitarlo los granos se separan en granos chicos y grandes. De ahí la desagradable tendencia de que en los paquetes de papas, el café, los cereales, entre otros, abajo quede polvito mientras que los pedazos más grandes se van hacia arriba. Esto plantea un problema importante para la industria de alimentos y farmacéutica. Dado que la Tierra está hecha de piedras, al ocurrir un terremoto este fenómeno puede producir el colapso de un edificio porque el terreno pierde resistencia mecánica.

¿Verdad que no era tan inútil fijarse en un puñado de arena? Curiosamente, hay otros lugares impensados donde ocurren estos fenómenos: el tráfico automotriz y la formación de plásticos y vidrios. En el caso del tráfico, los congestionamientos se dan porque los coches se atorán, como en los granos ¿se acuerdan? Los vidrios y los plásticos son materiales importantísimos para la tecnología. En ellos los átomos están desordenados. Esto conlleva grandes dolores de cabeza para los científicos dado que el estado más natural para los materiales es tener los átomos ordenados. ¿Por qué prefieren quedarse en desorden? Básicamente porque los átomos, así como los coches, dulces o los granos, también se atorán. Por eso, si entendemos bien un salero o una vitrina con dulces, probablemente comprenderemos mejor la formación de vidrios y plásticos, lo cual es uno de los problemas más importantes de la física moderna.

Cuando hablamos de tráfico automotriz, llegamos entonces a un nuevo tipo de experimentos que sin duda continuarán dándonos grandes sorpresas. En particular, la primera década del siglo XXI ha sido pródiga en el estudio de los llamados sistemas complejos mediante la colección de datos de manera masiva. Los sistemas complejos están formados por varios subsistemas que dan lugar a comportamientos colectivos interesantes). Esto sólo ha sido posible gracias al advenimiento de nuevas tecnologías como

el internet, las redes inalámbricas, los celulares y el GPS. Así, existen aplicaciones que permiten transmitir la posición y velocidad de un automóvil a una computadora. Ésta colecciona los datos, los cuales luego son procesados junto a millones de otros coches. Finalmente, al realizar análisis estadísticos, comienzan a emerger patrones que nos hablan, por ejemplo, de que en algunos aspectos el tráfico se puede comportar como un líquido, un sólido o un medio granular. Se han podido realizar experimentos similares con la red de celulares. Midiendo el tiempo que habla cada persona con sus conocidos, se puede determinar la red de amigos en una sociedad así como el grado de amistad de las personas.

De hecho, ya se han encontrado varias propiedades interesantes de estas redes. De modo análogo, las redes sociales, los buscadores, las estadísticas de la red permitirán un enfoque más cuantitativo a las ciencias sociales. A manera de ejemplo, recientemente se midió la felicidad en diversos países analizando la frecuencia de aparición de palabras tristes y alegres en el twitter. El resultado fue un “mapa de felicidad” de los Estados Unidos (por cierto, y sólo por la curiosidad, el ganador absoluto fue la isla de Hawaii). Otros ejemplos son el análisis de las mitologías clásicas mediante la teoría de redes, o el análisis de cuadros de pintores y textos literarios usando métodos de la física estadística y termodinámica. Estos experimentos están basados en una técnica llamada minería de datos, la cual está sin duda revolucionando la ciencia. Debe decirse que los recientes escándalos de espionaje cibernético están basados en estas técnicas. No sería descabellado pensar en que eventualmente se pueda tener un gobierno basado en la cibernética, con los riesgos o beneficios que esto implica. Hasta aquí hemos hablado de pequeños laboratorios y minería de datos. Debe decirse que este tipo de ciencia es muy interesante para un país como México, dado que requiere de inversiones pequeñas, pero al mismo tiempo ofrece resultados espectaculares. En realidad, lo que más se necesita en este tipo de ciencia es tener una gran dosis de creatividad. Afortunadamente, en México existen grupos de trabajo que desarrollado con gran éxito esta tarea y en los años que vienen, seguirán abriendo brecha en esta dirección.

Existen otros retos monumentales que sólo podrán resolverse con colaboraciones internacionales de gran envergadura. A este tipo de ciencia le podríamos llamar industrial. Si bien este tipo de ciencia ha sido la requerida para estudiar problemas importantes como en las altas energías, donde sólo la colaboración europea con otras naciones ha podido finalmente desentrañar los misterios de la física a nivel de los constituyentes elementales de la materia, hay muchos otros ejemplos: la estación espacial internacio-

nal, los reactores de fusión toroidales (JET) o el telescopio milimétrico en el Pico de Orizaba, Puebla. Esta ciencia industrial se afianzó al final del siglo XX, y hoy, en el siglo XXI, se vislumbran nuevas tendencias en este tipo de colaboración. Podemos pensar en la operación de máquinas a grandes distancias y no sería descabellado contar con trabajo virtual en el laboratorio. Es decir, si bien en este momento son comunes las videoconferencias de trabajo, éstas son limitadas porque la interacción entre los grupos no permite la manipulación de objetos a distancia, así como una interacción en tercera dimensión con el laboratorio. De este modo, podría estarse trabajando en un laboratorio, mientras que los investigadores se mueven de manera virtual dentro del mismo. La medicina se vería muy beneficiada con estos avances porque hay operaciones que podrían hacerse a control remoto con nano-máquinas usando realidad virtual.

Muchos de estos avances nunca habían sido tan necesarios. En el siglo XXI la humanidad por primera vez se enfrentará a una crisis civilizatoria debida a dos factores, por un lado, el agotamiento de los recursos naturales, especialmente los energéticos. Por el otro, a las cuestiones de la degradación del medio ambiente, calentamiento global, falta de agua y problemas alimentarios. Estos factores pondrán a prueba la capacidad de la sociedad para encontrar soluciones creativas. En esta etapa que vislumbramos como crítica para la preservación de la vida en el planeta, el pensamiento científico, basado en su herramienta principal llamada el método científico, basado en la experimentación, será una de las guías principales para transitar por un camino que lleve a buen término los retos del presente.

OBSERVANDO ANTIMATERIA CÓSMICA EN LA ESTACION ESPACIAL INTERNACIONAL

*Arturo Menchaca**

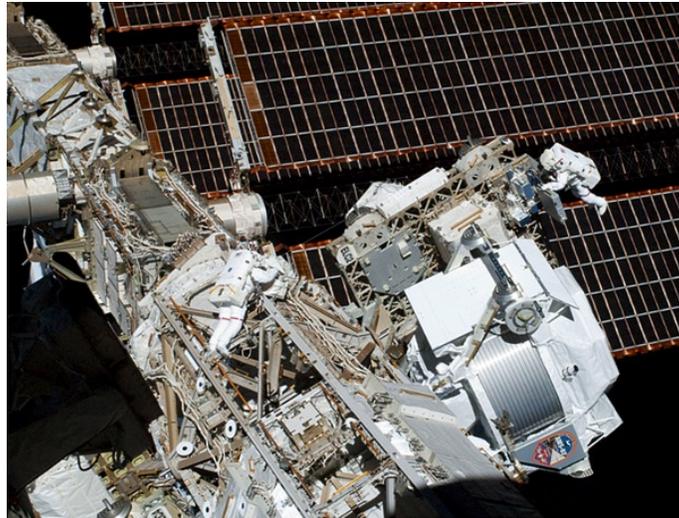


Figura 1: Vista del detector AMS en la Estación Espacial Internacional @NASA.

INTRODUCCIÓN

LA novela *Ángeles y Demonios*, del norteamericano Dan Brown, es sólo un ejemplo de la fascinación popular que inspiran ciertos temas de la física a los cuales, por no comprenderlos les asocian poderes increíbles. El éxito comercial de la obra de Brown ha dado trabajo a actores famosos como Tom Hanks, a quien en la película correspondiente se le ve buscar desesperado

* Departamento de Física nuclear y sus aplicaciones, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

dentro del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) una botella que contiene algunos gramos de antimateria, con lo que un científico incomprendido pretende destruir a la humanidad. No sorprende, entonces, una encuesta reciente del INEGI la cual muestra que, más que respetarlos, el mexicano teme a los científicos. Pero, ¿existe realmente la antimateria?, ¿qué es?, ¿cómo se obtiene?, ¿se puede llegar a producir suficiente cantidad de ella para destruir al mundo?, ¿sirve para algo bueno?, ¿hay alguien en México que estudie este tema? Éste es el tipo de preguntas que pretende responder este capítulo. En las siguientes secciones empezaremos por explicar lo más básico: la materia misma y cómo está estructurada. Esto permitirá introducir a la antimateria. También veremos que lo extraordinario de esta última sólo se observa cuando interacciona con la materia, y ocurre el fenómeno conocido como aniquilación. Lo anterior permitirá entender los objetivos y las dificultades de la búsqueda de antimateria en el Universo, el cómo se produce en el CERN, y en qué cantidad. A lo largo del camino demostraremos que el argumento principal de la novela de Brown es falso desde el punto de vista cuantitativo. Después se tratarán las aplicaciones de la antimateria, para al final describir los proyectos del CERN y de la NASA en que el autor de este capítulo participa con el propósito de aumentar nuestro conocimiento sobre el tema.

LA MATERIA

La física nos enseña que estamos hechos de átomos, y que éstos a su vez están constituidos por núcleos rodeados de electrones. Nuestro entendimiento actual indica que los electrones se encuentran al final de la escala de lo más pequeño, en el sentido de no poseer una estructura interna, lo que los define como partículas elementales. La materia de la que están hechos los núcleos, sin embargo, aun puede ser subdividida en diversas cantidades de protones y neutrones. Sin embargo, en una escala incluso más pequeña, todo parece indicar que estos últimos están constituidos por otras partículas, denominadas quarks. Nuestro entendimiento actual indica que estos últimos también representan el fin de la escala. Es decir, son partículas elementales. El calificar a los quarks como un indicio, se refiere al hecho de que nadie ha podido observar a un quark libre. Esto se explica porque la fuerza que une a los quarks, denominada fuerza fuerte, a partir de cierta distancia resulta ser una función directa, y no inversa, de la separación entre ellos. De esta manera, los quarks siempre se encuentran en grupos de dos, que forman mesones, o de tres, formando bariones, y quien intenta

arrancarle un quark a uno de éstos debe invertir tanta energía, que al separarlos se crean nuevos quarks que frustran el intento por observar a uno de ellos solo. A pesar de este inconveniente, el suponer que existen quarks al interior de los mesones y de los bariones ha permitido explicar satisfactoriamente la fenomenología de las partículas que son sensibles a la fuerza nuclear fuerte, denominadas hadrones. Por su parte, a aquellas partículas que, como el electrón, no son sensibles a la fuerza fuerte, se les denomina leptones. El término bosón que se utilizará más adelante está relacionado con una propiedad de las partículas denominada espín, cuyo símil clásico es un movimiento de rotación sobre sí mismo, como el que produce el ciclo día-noche en la Tierra. Sin embargo, aquí se trata de una característica de origen cuántico, razón por la cual posee un valor particular, que llamaremos cuantizado. Así, el espín de los bosones es cero, o un múltiplo entero del espín del fotón, o sea el cuánto de luz. Cabe agregar que el espín del electrón y el de los quarks, es semi-entero, o sea la mitad del asociado al fotón, lo que los identifica como fermiones. En general, el espín de los fermiones debe ser un número impar de veces el del electrón. El comportamiento estadístico de los bosones y de los fermiones es tan diferente que separa al mundo de lo elemental en dos. Cabe agregar que la definición de bosón implica que un sistema constituido por dos fermiones, por ejemplo un mesón, forma un bosón, pues la suma de los espines de sus constituyentes es cero o un múltiplo entero del que tiene el fotón. Un conjunto particular de bosones es el de los bosones de norma, que son los mensajeros de las cuatro fuerzas fundamentales.

LA ANTIMATERIA

Una peculiaridad de los constituyentes más elementales de la materia es que cada partícula, como el electrón, o el cuark, tiene asociada otra partícula cuyas propiedades son idénticas, salvo una. Para aquellas que poseen carga eléctrica, la diferencia es el signo de la carga. El ejemplo más sencillo es el electrón, cuya partícula asociada es el positrón, cuyo signo de carga es positivo, es decir, opuesto al del electrón. Lo sorprendente, es que cuando un electrón y un positrón interactúan, en determinadas condiciones se aniquilan entre sí, generándose dos fotones, que viajan en direcciones opuestas. En este proceso lo que se conserva no es la masa, sino la energía. Más interesante aun, la aniquilación resulta ser reversible: en determinadas condiciones, a partir de fotones con suficiente energía, se pueden producir pares electrón-positrón, o cuark-anticuark, entre otras posibilidades. En ge-

neral, dependiendo de la energía total, formada por la energía en reposo y la cinética inicial, la aniquilación partícula-antipartícula, además de bosones de norma, como el fotón, y mesones, puede producir pares de otras partículas, como leptones no-electrónicos (muones, tauones, o neutrinos), y/o bariones (protón-antiprotón, neutrón-antineutrón, incluso pares más pesados). También, bosones, incluidos los de norma, con suficiente energía, al interactuar con otras partículas, pueden generar pares, como en el recién mencionado caso del fotón.

EL MODELO ESTÁNDAR

Volviendo a los quarks, hoy se piensa que sólo existen seis tipos o “sabores” de ellos, etiquetados por las letras *u*, *d*, *s*, *c*, *t* y *b*, que son iniciales de las palabras inglesas: *up* (arriba), *down* (abajo), *strange* (extraño), *charm* (encanto), *top* (cima) y *bottom* (fondo), respectivamente. Una de las diferencias importantes entre los seis tipos de quarks está su masa, la cual los agrupa en tres generaciones: ligeras (*u*, *d*), medias (*s*, *c*) y pesadas (*t*, *b*). La otra característica que las distingue es su carga eléctrica, cuya magnitud resulta ser sólo una fracción ($1/3$ o $2/3$) de la del electrón. Otra propiedad cuántica fundamental de los quarks se denomina color. Este término se deriva de la manera en que se combinan los quarks para formar mesones, hechos en realidad de un quark y un antiquark, o bariones como el protón y el neutrón (hechos de tres quarks,). Los colores siempre se cancelan. ¿Cómo se logra esto? A través de un mecanismo que es similar al que ocurre cuando se mezclan los tres colores fundamentales para producir el blanco, que es ausencia de color. Es justamente esta coincidencia con la cromática óptica lo que justifica el llamar color al origen de la fuerza fuerte. Resulta que el color de los antiquarks es negativo, es decir, se cancela con el de los quarks. Por eso, los mesones también resultan ser cuanto-cromáticamente neutros.

Hemos visto que las partículas elementales tienden a formar sistemas, como átomos, mesones o bariones, y hemos mencionado que los dos últimos lo hacen por la influencia de la fuerza fuerte, que actúa entre hadrones. Otra fuerza fundamental de la naturaleza es la llamada electromagnética, que actúa entre partículas que poseen carga eléctrica y/o momentos magnéticos, en el caso de partículas compuestas, como el neutrón y el protón. Ésta fuerza es responsable, por ejemplo, de unir los electrones al núcleo. Una fuerza que el lector echará de menos en esta descripción es la gravitacional, que actúa entre partículas que poseen masa. Sin embargo, en la escala de las partículas elementales esta forma de interactuar resulta ser

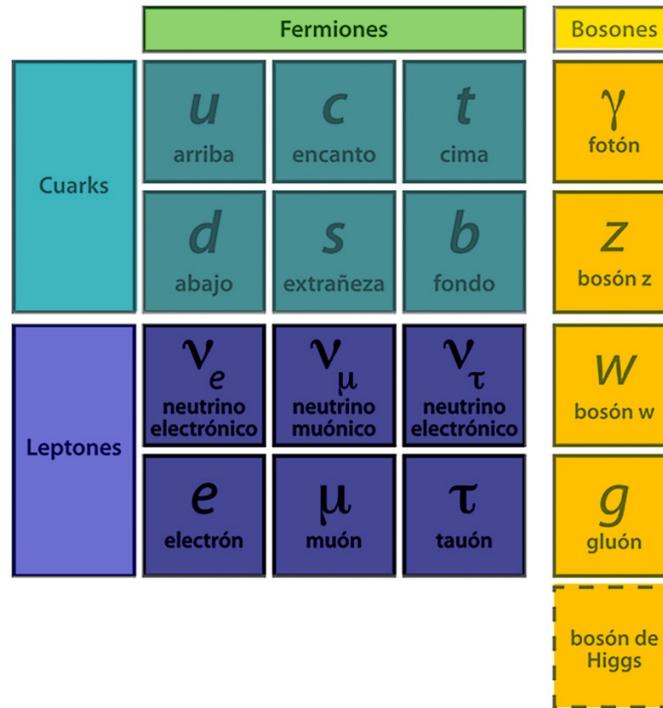


Figura 2: El Modelo Estándar.

despreciable. La cuarta fuerza fundamental se denomina débil, pues su intensidad es comparativamente menor a la fuerte y a la electromagnética. Este modo de interactuar es, en cierta manera, el más democrático de todos, pues a él son sensibles tanto los hadrones como los leptones, tengan o no carga eléctrica, o masa. Al formalismo matemático que permite sistematizar a las fuerzas fundamentales se le denomina teoría cuántica de campos, la cual postula que cada fuerza es mediada por los bosones de norma. Hemos ya mencionado al fotón, que es el bosón de norma del campo electromagnético. Por su parte, el campo asociado a la fuerza fuerte es mediado por el gluón, y se supone que a nivel cuántico el responsable de transmitir la gravedad es el gavitón. Una similitud importante entre estos tres bosones de norma es que no poseen masa. Por su parte, la fuerza débil se transmite no por uno, sino por tres bosones de norma, denominados Z_0 (eléctricamente neutro) y W^{+-} . Aquí, el superíndice quiere decir que los hay con carga eléctrica de un signo o del otro. Otra peculiaridad de la fuerza débil es que sus bosones de norma sí tienen masa.

El único leptón mencionado hasta ahora es el electrón. Sin embargo, a esta familia de partículas también pertenecen otras dos con propiedades electromagnéticas idénticas al electrón, pero más pesadas que éste. Se trata del muón y del tauón. El muón posee una masa mayor que la del electrón, pero menor que la del tauón. El muón es el vestigio más fácil de identificar de la radiación cósmica que incide sobre la superficie terrestre. El tauón es el leptón más masivo e inestable que se conoce. El conjunto de los leptones se completa con tres partículas eléctricamente neutras denominadas neutrinos, cuya masa es tan pequeña, que a la fecha ha resultado imposible de medir con precisión, aunque se sabe que no es cero. También se ha observado que la fuerza débil permite determinar, de manera clara, una relación muy íntima entre cada uno de los tres leptones cargados y un tipo específico de neutrino. Así es como sabemos que hay tres tipos de neutrino, el electrónico, el muónico y el tauónico.

El conjunto formado por las doce partículas elementales mencionadas hasta ahora –seis quarks y seis leptones–, más los cinco bosones de norma relevantes y las herramientas cuánticas específicas de la teoría de campo correspondiente, es decir la electrodinámica y la cromodinámica, constituyen casi todos los ingredientes básicos del denominado Modelo Estándar. Sólo falta agregar un elemento que explica el hecho de que algunos bosones de norma tengan masa, y otros no. Me refiero al modelo propuesto por Peter Higgs en 1964, quien planteó la existencia de un campo de fuerzas omnipresente que interacciona con todas las partículas, en particular con las W^{+-} y la Z_0 , provocándoles una inercia o masa. El bosón correspondiente fue descubierto en 2012 en el CERN. Tal hallazgo completa la lista de partículas predichas por el Modelo Estándar y constituye un logro singular para la física de partículas.

Sin embargo, es importante hacer notar que aún quedan incógnitas importantes en esta física. Una de ellas es que los leptones, como los quarks, muestran una marcada diferencia entre las masas de los leptones cargados, lo que sugiere también la existencia de tres generaciones, formadas por el electrón y su neutrino, el muón y su neutrino, y el tauón y su neutrino. El origen de esta coincidencia, seis quarks, seis leptones y tres generaciones en cada caso, es un misterio que sugiere una posible simetría leptón-hadrón que los conecta. De existir, esta Gran Unificación, implicaría que el protón, el barión más ligero, debería decaer produciendo un positrón, que es el leptón cargado más ligero. Pero tal cosa no se ha observado. Otro modelo propone la existencia de una gran “supersimetría” (apodada SUSY) que implicaría la existencia de toda una familia de nuevas partículas que conec-

tarían a los fermiones con los bosones. La más ligera de estas partículas, que sería estable, se denomina neutralino y será importante al hablar de posibles explicaciones para el fenómeno cosmológico denominado materia oscura (MO) desde el punto de vista de la física de partículas. Cabe agregar que hay otro modelo de esta física que predice la existencia de partículas tampoco observadas –y que también son candidatas a explicar la MO–: las denominadas de partículas asociadas de Kaluza-Klein, apellidos de los autores de la versión no-cuántica de esta teoría, que implica la existencia de dimensiones espaciales extras.

¿CÓMO SE OBTIENE LA ANTIMATERIA?

Hemos visto que las partículas pueden ser creadas a partir de la energía, obedeciendo las reglas cuánticas de conservación y la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$. Una de esas reglas establece que las partículas y sus antipartículas se crean por pares. Por ejemplo, a partir de un fotón cuya energía sea superior al doble de la masa del electrón multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado, se puede crear un par electrón-positrón. Recuerde: el electrón y el positrón tienen la misma masa. Este proceso es más frecuente de lo que uno podría imaginarse, ya que la Tierra es bombardeada constantemente por un tipo de radiación proveniente del cielo, denominada por lo mismo: “cósmica”. Esta radiación llega a ser mucho más energética que el mínimo mencionado antes. Es decir, cotidianamente se genera alrededor nuestro una pequeña cantidad de antimateria, positrones, misma que se aniquila en poco tiempo, ya que (afortunadamente) vivimos en un mundo dominado por la materia. Otra fuente de antimateria, también de positrones, es el decaimiento de ciertos núcleos que son inestables ante una forma de radioactividad denominada β^+ , por efecto de la fuerza débil. Una producción más significativa de antimateria se puede lograr utilizando un acelerador de partículas suficientemente energético. Por ejemplo, para producir un par electrón-positrón hace falta una energía de 1.22 MeV . Un MeV es un millón de electrón-voltios, y un electrón-voltio es la energía típica de los fotones que iluminan esta página. El acelerador más grande del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) que opera en el CERN, puede producir cantidades enormes de positrones, entre otras partículas de antimateria, como anti-mesones, incluso anti-protones y anti-neutrones, ¡en cada colisión!

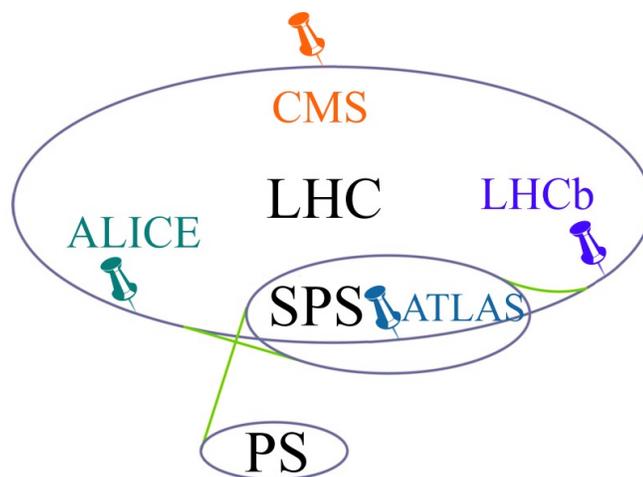


Figura 3: Esquema de aceleradores del CERN.

APLICACIONES PRÁCTICAS

Aunque la antimateria parece sólo una curiosidad más de la física de partículas, ha encontrado aplicaciones prácticas de gran importancia, por ejemplo, en medicina. El lector se sorprenderá en saber que en varios hospitales mexicanos se utiliza la aniquilación de positrones con los electrones del cuerpo humano para producir imágenes médicas que salvan vidas cotidianamente. Esta técnica de diagnóstico se denomina PET (por sus siglas en inglés de *Positron Emission Tomography*, o tomografía por emisión de positrones). Como ya se mencionó, estos positrones son producto del decaimiento de núcleos radiactivos que se producen con aceleradores tipo ciclotrón, como el que está instalado en la Facultad de Medicina de la UNAM. Una aplicación, aún en desarrollo, es el uso de antimateria para producir energía. Una medida de la eficiencia de un combustible es la cantidad de energía que produce comparada con la masa que se pierde. Este concepto se basa en la ecuación de Einstein $E = mc^2$. En las reacciones químicas utilizadas como fuente energética por la humanidad, la cantidad de masa que se transforma en energía es apenas una milésima de millonésima (10^{-9}) parte de la inicial. En el caso nuclear, esa proporción pasa a ser del orden de una milésima (10^{-3}) parte, que es un millón de veces mayor. Sin embargo, en la aniquilación electrón-positrón toda la masa se transforma en energía. Es decir, se trata del energético último.

El problema, sin embargo, yace en la producción y conservación de este

energético. La mayor cantidad de antimateria neutra, antinúcleos con sus respectivos positrones, que se ha logrado producir en el CERN es de unos trescientos átomos, que se han podido aislar durante menos de 20 minutos. La energía ahí concentrada es equivalente a la que produce la combustión de 10⁻⁹ litros de gasolina, o sea menos de una millonésima de gramo, y también menos que la energía que hay en la cabeza de un cerillo. El costo de producir esta antimateria es de decenas de millones de dólares. Es decir, dista mucho de ser una tecnología viable, todavía. Sin embargo, hay que admitir que esa energía está tan concentrada que podría ser interesante como combustible en vuelos espaciales, en que un problema crucial es la masa del combustible. Cabe agregar, regresando a la introducción, que los pocos gramos de antimateria de la novela de Dan Brown serían 10²¹ veces más que lo que se ha logrado producir en el CERN. Aún así, eso equivaldría a la energía de 10 bombas nucleares, que serían suficientes para destruir la ciudad de Ginebra, donde está el CERN, pero no al planeta.

ANTIMATERIA CÓSMICA

Un tema que relaciona a la antimateria con el origen del Universo, es que las medidas hechas utilizando aceleradores terrestres indican que hay una simetría de las leyes de la física que haría suponer que la enorme energía inicial del Big Bang debió dar como resultado cantidades iguales de materia y antimateria. Un problema con este modelo es que todo parece indicar que, para suerte nuestra, en la época actual el Universo está compuesto principalmente de materia. La pregunta natural es, entonces, y... ¿que pasó con la antimateria? Los modelos propuestos para responder a esto coinciden en sugerir que en el Big-Bang, la gran mayoría de las partículas de materia y de antimateria se aniquilaron. Lo que no sabemos aun es cómo la materia que nos rodea sobrevivió a esta catástrofe. Una hipótesis es que la simetría materia-antimateria en que se basa el modelo no es exacta, y que el exceso de materia que ahora vemos siempre existió. Si bien hay evidencias experimentales a favor de esa teoría, aún no se descubre el mecanismo capaz de producir una asimetría tan pronunciada como la que se requiere para explicar el universo actual.

Otra posibilidad es que originalmente se dieron pequeñas inhomogeneidades espaciales en que ya sea la materia, o la antimateria, resultaron dominantes. En la expansión estas zonas se separaron, aniquilándose toda la materia y la antimateria intermedia. En ese caso, al igual que la materia, la antimateria debió formar el mismo tipo de estructuras que hoy observamos

en el Universo, con estrellas y galaxias. De ser así, hoy en día sería difícil deducir si algún objeto celeste observado desde la Tierra está hecho de materia o de antimateria, pues la luz emitida en ambos casos sería idéntica. Sin embargo, además de luz, las estrellas también emiten las partículas de las que están compuestas, especialmente al final de su vida. Esas partículas, que incluyen núcleos atómicos, viajan luego por el Universo y constituyen lo que se conoce como la radiación cósmica primaria. Así, bastaría con estudiar las partículas y antipartículas (en caso de haber anti-estrellas) que llegan a la Tierra con gran energía luego de su viaje sideral. Naturalmente, la búsqueda de esta antimateria debería realizarse más allá de la atmósfera terrestre, ya que al interactuar con ella las antipartículas se aniquilarían.

Hace más de 15 años el Instituto de Física de la UNAM se unió a una colaboración internacional dedicada a resolver este problema. El proyecto, denominado AMS (*Alpha Magnetic Spectrometer*), consistió en construir un instrumento que distinguiese a las partículas de las antipartículas. Luego de un largo proceso, que sufrió una interrupción a causa del desastre de la Nave Espacial Columbia en 2003, entre otros problemas, la segunda versión del AMS, denominada AMS 02, fue finalmente instalado en la Estación Espacial Internacional (EEI) en mayo del año 2011. La construcción del AMS, fue propuesta por Samuel Ting, investigador del MIT y Premio Nóbel 1976, y con él trabajan investigadores de varios países del mundo. El aparato se llama así por estar asociado a la EEI, que es conocida por los norteamericanos como Estación Alfa, y porque el principal instrumento que lo constituye es un imán que permite medir la masa, la carga y el signo de las partículas que lo cruzan, constituyendo lo que los físicos conocen como un espectrómetro de masas. Una componente importante de este instrumento es un tipo de detector de partículas denominado de Cherenkov por reconstrucción de anillos (en inglés: *Ring Imaging Cherenkov*, abreviado RICH). Éste sirve para medir la velocidad y la carga eléctrica de las partículas, a partir de la radiación luminosa que se produce cuando las partículas que lo cruzan viajan a velocidades cercanas a la de la luz. En particular, la participación del IFUNAM en AMS 02 consistió en la caracterización óptica del material mismo en que se produce la luz de Cherenkov, denominado el radiador.

Luego de siete años de tomar datos, la Colaboración AMS 02 ha publicado una decena de artículos. Entre ellos, se han reportando medidas sobre el espectro de energías de positrones cósmicos, generando gran expectativa, pues como veremos a continuación, muestra un avance significativo en el entendimiento de la materia oscura (MO). A nivel cósmico los positrones que llegan a la vecindad de la Tierra son considerados como una

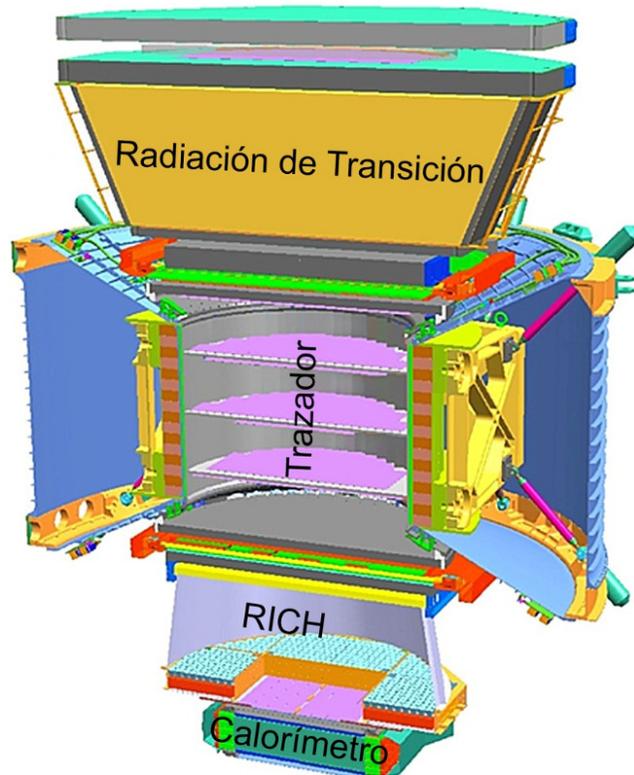


Figura 4: Esquema del detector AMS @CERN.

radiación secundaria. Es decir, la mayor parte de ella se produce en la colisión de la radiación primaria con la materia interestelar que encuentra en su viaje hacia nuestro planeta. Tal mecanismo predice un espectro de positrones, como el de electrones, debe depender de la energía E como una ley de potencia E^a , donde "a" es un número negativo. Por lo tanto, se debería observar una caída monotónica del flujo de los positrones a medida que aumenta su energía. Hace unos años, un antecesor del AMS, denominado PAMELA, encontró que a 10 GeV se produce una desviación de esa ley, que introduce un exceso de positrones. Este resultado sorprendente generó una serie de interpretaciones que se pueden separar en dos categorías: cosmológicas y de física de partículas. Básicamente, las explicaciones cosmológicas proponen mecanismos macroscópicos, como vestigios de supernovas antiguas en la Vía Láctea o pulsares cercanos. En ambos casos se supone que estos objetos producen ondas de choque magnéticas que aceleran los rayos

cósmicos en dirección de la Tierra, generándose pares electrón-positrón en el camino.

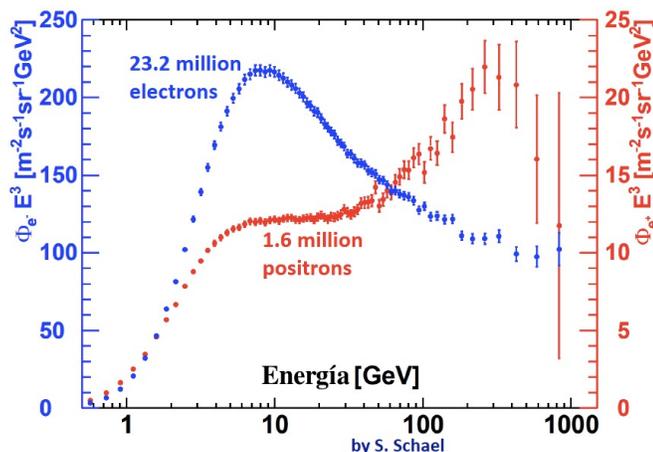


Figura 5: Espectro reciente de positrones obtenido por AMS 02.

La interpretación de física de partículas supone que la MO está compuesta de partículas hipotéticas de gran masa que sólo interactúan por la vía del campo débil. Estas partículas se conocen como WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*). La identidad de los WIMPs queda por aclararse, pero hemos visto que partículas como los neutralinos y las partículas asociadas de Kaluza-Klein son posibles candidatas. La diferencia más notable entre ambos modelos es que las fuentes cosmológicas producen flujos que no deberían ser isotrópicos, vistos desde la Tierra. Por el contrario, a nivel cosmológico se espera que la MO esté uniformemente distribuida en el espacio interestelar. Tal hecho no pudo ser corroborado por PAMELA, pues es un detector pequeño que colectó relativamente pocos positrones.

Por su mayor tamaño, el AMS 02 ha podido acumular decenas de veces más estadística que su antecesor, habiendo podido determinar que el flujo de positrones es altamente simétrico. Así, la observación de AMS restringe apreciablemente las interpretaciones cosmológicas para el exceso de positrones. Cabe agregar que un exceso de positrones no debería ser la única evidencia a favor de la física de partículas. La presencia de materia oscura debe también tener efectos en el flujo de otras partículas, como los antiprotones, entre otras observables, lo cual también ya ha sido reportado por AMS 02. Otro observable interesante es el flujo de antideuterones,

que son antinúcleos del isótopo estable del isótopo denominado deuterón, compuesto por un protón y un neutrón. Se ha predicho que la aniquilación de MO para producir pares deuterón-antideuterón representaría una señal muy limpia para confirmar su existencia. El mecanismo de creación de estos antinúcleos en el Large Hadron Collider del CERN ha sido estudiada por investigadores del IFUNAM. Este conocimiento es ahora aplicado para generar la mejor predicción sobre la magnitud del fondo de radiación secundaria en que se encontraría inmersa la señal de MO en AMS 02.

En resumen, se ha hecho una revisión breve de la imagen que hoy se tiene sobre la estructura más íntima de la materia, introduciendo el concepto de antimateria, mencionando al Modelo Estándar, y agregando conceptos aún no comprobados como el de supersimetría y la materia oscura. Vimos como se obtiene la antimateria en el laboratorio, mencionando algunas de sus aplicaciones, así como las ideas que se tienen sobre su producción en el cosmos, desde el Big Bang hasta las supernovas. Luego se describió el proyecto espacial AMS 02, en el que participan miembros del Instituto de Física de la UNAM, uno de cuyos propósitos es poner a prueba la hipótesis de que la materia oscura pudiese tener una explicación basada en la física de las partículas elementales. Finalmente, se mostraron los primeros resultados del proyecto AMS 02, mostrando evidencias que apoyan tal hipótesis. Este es sólo el inicio de una serie de estudios del mencionado proyecto que permitirán profundizar en nuestro conocimiento sobre el cosmos y su funcionamiento. La participación de mexicanos en este tipo de experimentos, denominados de gran ciencia, demuestra que México participa en forma activa en incrementar el conocimiento humano desde sus bases más fundamentales.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

LA ESTRUCTURACIÓN DISIPATIVA FOTOQUÍMICA DE LA VIDA

*Karo Michaelian**, *Lenin F. Escamilla-Herrera†*, *Oscar Rodríguez ‡*

INTRODUCCIÓN

LAS teorías propuestas sobre el origen de la vida, necesariamente deben ofrecer una explicación físico-química para el incremento en la complejidad de las estructuras a un nivel molecular. Los paradigmas tradicionales, la “supervivencia del más fuerte” o la “estabilidad química”, son claramente deficientes al estudiar la estructuración de la vida desde un nivel molecular. Por lo tanto, resulta más razonable considerar únicamente los procesos físico-químicos bien conocidos para explicar el ordenamiento de la materia en condiciones fuera del equilibrio. Este ordenamiento ocurre exclusivamente a través de la disipación de un potencial termodinámico generalizado externamente impuesto, o dicho de otro modo, por un incremento concomitante en la producción global de entropía del sistema interactuando con su entorno (Prigogine, 1961). La teoría de la disipación termodinámica para el origen y evolución de la vida (Michaelian, 2009, 2011a, 2011b, 2015, 2016, 2017), sugiere que cada incremento en la complejidad de la vida durante su evolución, desde la formación de moléculas prebióticas a partir de moléculas precursoras más simples, pasando por la asociación de éstas en organismos celulares complejos, hasta el acoplamiento jerárquico de procesos bióticos y abióticos en la biosfera actual, necesariamente deben involucrar un incremento en la disipación de algún potencial termodinámico generalizado impuesto de forma externa (Onsager, 1931a, 1931b, Prigogine, 1961). Hemos identificado (Michaelian, 2009, 2011a) que el potencial más importante que dio lugar al incremento de la complejidad en el origen de la vida, fue el potencial fotónico solar de longitud de onda larga UVC. Este potencial fotónico alcanzó la superficie de la tierra mucho tiempo antes del origen de la vida y perduró por lo menos mil millones de años hasta el fin del periodo Arqueano (Sagan, 1973), cuando la producción de oxígeno por medio de la fotosíntesis oxigénica sobrepasó a los sumideros naturales de este elemento (ver Figura 1). Tales longitudes de onda en el UVC son ideales para la estructuración

* Departamento de Física Nuclear y Aplicación de Radiaciones, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

† Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México

‡ Posgrado en Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México

molecular, dado que estas tienen suficiente energía para romper y reformar los enlaces covalentes de carbono, pero no la suficiente para disociar las moléculas basadas en el carbono (Michaelian, 2011b, 2011a, 2015).

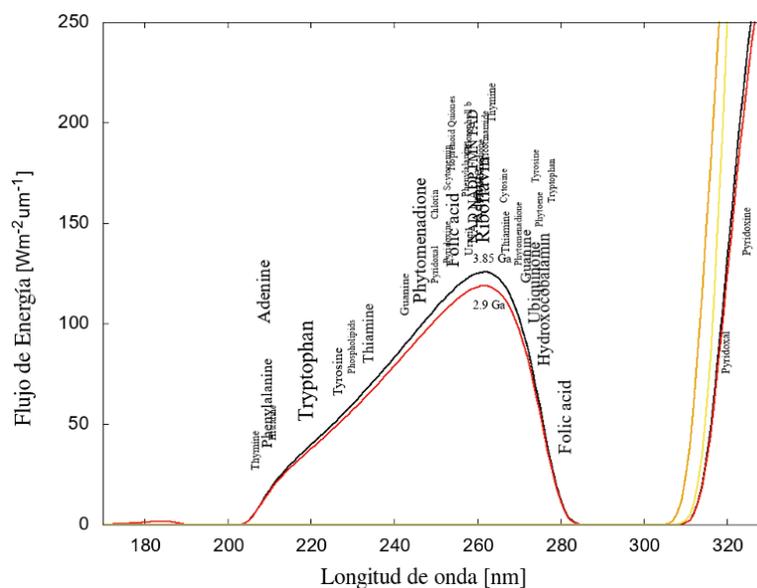


Figura 1: Las longitudes de onda de máxima absorción de muchas de las moléculas fundamentales de la vida (comunes a los tres dominios) coinciden con una ventana atmosférica predicha en el UVC en el momento del origen de la vida hace aproximadamente 3.85 Ga (1Ga= mil millones de años) y hasta al menos 2.9 Ga (curvas negro y rojo respectivamente). Alrededor de los 2.2 Ga (curva amarillo), la luz UVC en la superficie de la Tierra había sido extinguida por el oxígeno y el ozono resultantes de organismos que realizaban la fotosíntesis oxigénica. La curva verde corresponde al espectro de superficie actual. En esta figura, el tamaño de fuente de la letra indica aproximadamente el tamaño relativo del coeficiente de extinción molar de la molécula fundamental indicada (pigmento). Crédito de imagen; adaptado de (Michaelian and Simeonov, 2015).

El programa disipativo de la naturaleza que resulta en una mayor complejidad biológica, ha permanecido desde la disipación inicial de longitudes de onda en el UVC durante el periodo Arqueano, llevado a cabo por las moléculas fundamentales de la vida (ver Figura 1) (Michaelian and Simeonov, 2017), hasta la disipación de casi todas las longitudes de onda en el visible, realizado por los pigmentos orgánicos en la actualidad. Por lo tanto, una gran parte de la historia biológica se ha tratado de la evolución de complicados caminos biosintéticos para producir, proliferar, y mantener a los cromóforos que pueden disipar cada vez mayores longitudes de onda, cubriendo de este modo una región más amplia del espectro solar

de aún mayor intensidad. El acoplamiento simultáneo de procesos irreversibles bióticos y abióticos (tales como las corrientes de viento y oceánicas o como el ciclo del agua) permiten la disipación de longitudes de onda aún mayores que en el rojo, dando lugar a un proceso disipativo global eficiente, conocido como la biosfera (Michaelian, 2012a). Tal descripción de la evolución biótica-abiótica, misma que lleva a un aumento de la complejidad a través de la disipación, es consistente con las observaciones de que el acoplamiento de tales procesos irreversibles ocurre siempre tal que la estructuración pueda reducir los impedimentos en contra de una mayor producción global de entropía (Onsager, 1931a, 1931b, Morel and Fleck, 1989).

Uno de los incrementos en la complejidad de gran relevancia para el origen de la vida, fue la formación de las primeras protocélulas, las cuales consistían de vesículas formadas por lípidos, y su encapsulación de las moléculas fundamentales de la vida tales como ácidos nucleicos y aminoácidos (ver Figura 2). Aunque existen varias rutas propuestas para la formación de las primeras vesículas y la encapsulación de las moléculas fundamentales, muchos de estos escenarios son incompatibles con los principios de la termodinámica fuera del equilibrio, en particular con el principio de que la formación de la estructura y el aumento de la complejidad tiene que ser a través de la disipación de un potencial termodinámico generalizado externamente impuesto. Por lo tanto, los principios de la termodinámica fuera del equilibrio, son una gran herramienta para delinear los procesos legítimos que estuvieron involucrados en la formación de estructuras moleculares complejas que condujeron al origen de la vida en el Arqueano.

Por lo tanto, el marco termodinámico nos lleva a considerar que, previo a la formación de caminos biosintéticos complejos, las moléculas orgánicas que participaron en el origen de la vida, podrían haberse formado a partir de moléculas precursoras comunes, a través de la estructuración disipativa microscópica bajo luz UVC (Michaelian, 2017) guiada por procesos físico-químicos consistentes con las condiciones ambientales que prevalecían.

A continuación presentamos de forma breve un panorama general de la termodinámica y la mecánica estadística tanto en equilibrio como fuera de éste, así como de las teorías del origen y evolución de la vida.

TERMODINÁMICA Y MECÁNICA ESTADÍSTICA; EQUILIBRIO TERMODINÁMICO

La termodinámica es una de las áreas de estudio con mejor estructura lógica de la física, además de ser una de las ramas de la física más generales y exitosas, en el sentido de que es aplicable a una gran variedad de sistemas con estructura y propiedades físicas muy diversas. La termodinámica se dedica a definir un número pequeño de cantidades macroscópicas adecuadas para describir propiedades promedio de los sistemas y explicar como éstas, se relacionan entre sí por medio de ecuaciones universalmente válidas. Este éxito es sorprendente dada de la naturaleza puramente fenomenológica de la termodinámica, ya que se originó durante la revolución industrial como un mero estudio práctico de sistemas físicos de interés

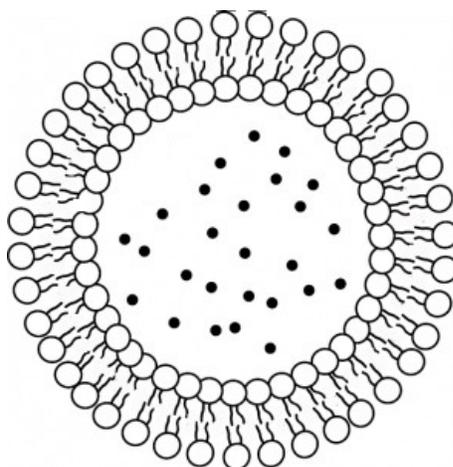


Figura 2: Modelo de protocélula que consiste de una vesícula formada de ácidos grasos que encapsula moléculas fundamentales de la vida, tales como ARN, ADN y aminoácidos. En nuestro modelo de estructuración disipativa fotoquímica, las moléculas de ácidos grasos habrían tenido colas hidrocarbonadas hidrofóbicas de 18 átomos de carbono con 3 dobles enlaces conjugados (trieno), cuya absorción se encuentra exactamente dentro de la región de 220 a 290 nm (ver Figura 1) y que es estable a altas temperaturas de la superficie del océano durante el Arqueano ($\sim 85^\circ$ C). El ARN o ADN encapsulado actuaría como aceptores de energía para disipar en calor, a través de sus intersecciones cónicas, la energía de excitación inducida por los rayos UVC en las moléculas de ácido graso.

como los motores de vapor, y está fundamentada en observaciones puramente empíricas. Con el tiempo, la termodinámica se ha convertido en una disciplina formal basada en la ley cero, la primera y la segunda ley de la termodinámica. No se ha encontrado hasta ahora ningún sistema que no obedezca estas leyes.

Por otro lado, gracias a la teoría cinética de los gases, fue posible explicar el comportamiento macroscópico de los sistemas gaseosos en términos del movimiento de las partículas que lo forman. Gracias al teorema-H desarrollado por Ludwig Boltzmann, fue posible establecer una conexión entre la entropía definida por la termodinámica y la dinámica de las moléculas. Trabajos posteriores dentro de la teoría cinética llevaron al desarrollo de una técnica superior: la teoría de ensambles. Éstos y otros avances convirtieron a la termodinámica en la consecuencia fundamental de combinar la mecánica y la estadística de un gran número de partículas microscópicas que constituyen a un sistema; ésto marcó el nacimiento de la sucesora de la termodinámica: la mecánica estadística, la cual hizo posible estudiar a los sistemas macroscópicos, desde una perspectiva microscópica y de primeros principios.

Lo anterior sentó las bases para el desarrollo de la termodinámica y la me-

cánica estadística de una gran cantidad de diversos sistemas, sin embargo éstos se limitan a los llamados sistemas en equilibrio (o asimismo, que pasan por diferentes cambios tan lentamente que se consideran en equilibrio para fines prácticos) (Callen, 1985), es decir, que se encuentran en los llamados estados de equilibrio termodinámico, los cuales son caracterizados por la ausencia de flujos macroscópicos de materia o energía, ya sea de forma interna o directamente hacia otros sistemas. Cuando un sistema se encuentra en un estado de equilibrio termodinámico, éste no presenta cambios macroscópicos. Los sistemas pueden ser sacados del equilibrio mediante algún proceso termodinámico no controlado (como un calentamiento o una compresión del sistema, entre otros), al pasar por alguno de estos procesos, los sistemas presentan flujos no balanceados, así como inhomogeneidades internas asociadas.

TERMODINÁMICA FUERA DE EQUILIBRIO Y FENÓMENOS IRREVERSIBLES

La termodinámica fuera de equilibrio (TFE) estudia sistemas en situaciones considerablemente más realistas, en las cuales existen velocidades finitas en los componentes que los forman, así como efectos inhomogéneos (Lebon et al., 2008). La TFE toma conceptos y herramientas de la termodinámica en equilibrio, pero éstos son considerados solo a una escala local, dado que en general los estados fuera de equilibrio son inhomogéneos. En estas situaciones las variables de estado fuera del equilibrio, no solo cambian dentro del sistema, sino que también pueden cambiar en el tiempo. Los pioneros en la TFE fueron L. Onsager (Onsager, 1931a) e I. Prigogine (Prigogine, 1961), además de los trabajos de De Groot y Mazur (Groot and Mazur, 1962), entre muchos otros, quienes extendieron la teoría y delimitaron sus regímenes de validez.

Para un sistema fuera de equilibrio, la TFE se enfoca en tres objetivos principales, tal como lo establecen G. Lebon et al (Lebon et al., 2008). El primer objetivo es proveer de fundamento termodinámico a las ecuaciones de transporte, ya sea de calor, masa, momento y carga eléctrica, además de la ley de Fourier que relaciona el flujo de calor con el gradiente en la temperatura, así como otras relaciones similares. El segundo objetivo de la TFE es proponer una descripción sistemática para describir el acoplamiento entre los efectos térmicos, mecánicos y electromagnéticos, tales como el efecto Soret, también conocida como termofóresis, y que describe el fenómeno que ocurre en mezclas de diferentes tipos de partículas y la respuesta que exhiben éstas a las fuerzas producidas por un gradiente de temperatura, entre otras relaciones similares. El tercer objetivo de la TFE es el estudio de los estados disipativos estacionarios de no equilibrio, para los que sus propiedades no dependen del tiempo, sin embargo están caracterizados por una distribución no homogénea de las variables de estado fuera del equilibrio y valores no nulos de los diferentes flujos que existen en los sistemas.

A pesar de éstos y otros avances, una de las principales complicaciones es la imposibilidad de definir a la entropía a un instante de tiempo dado en términos macroscópicos para sistemas fuera del equilibrio, esto puede ser realizado de for-

ma aproximada en casos particulares, como aquellos en donde existe un equilibrio local (Lebon et al., 2008). Por fortuna, la gran mayoría de los procesos que ocurren en la superficie de la tierra ocurren a densidades suficientemente grandes y tiempos suficientemente largos para asegurar la validez de la aproximación de equilibrio local (Prigogine, 1961). En nuestro trabajo, pretendemos estudiar el origen y evolución de la vida, basándonos en las herramientas de la termodinámica fuera de equilibrio y en su extensión a la mecánica estadística.

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA VIDA EN LA TIERRA: UN PROBLEMA MULTIDISCIPLINAR

El origen de la vida ha sido uno de los más interesantes temas de estudio a través de la historia de la humanidad; partiendo de los mitos de las culturas antiguas a lo largo del planeta, pero que dista mucho de tener una solución aún al día de hoy. A pesar de que existen propuestas científicamente razonables, no hay ninguna que sea universalmente aceptada por las diversas falencias y carencias que exhiben; asimismo, aún no existe un consenso que delimite claramente el concepto de vida, mismo que dificulta establecer el origen de la misma. Una de las pocas ideas aceptadas de forma casi universal es que toda la vida moderna se originó a partir de un único organismo primitivo. Las primeras indagaciones científicas sobre el origen de la vida se dieron gracias a los descubrimientos y estudios llevados a cabo por Charles Darwin y plasmados en su famoso libro *El Origen de las Especies* (Darwin, 1859), donde explica el mecanismo de la evolución de las especies mediante la selección natural; mutaciones microscópicas que dan lugar a cambios físicos macroscópicos seleccionados por una lucha constante por la sobrevivencia entre organismos y sus ambientes, sugiriendo que todas las especies actuales descienden de un ancestro común.

La primera teoría materialista, científicamente sofisticada y al mismo tiempo ambiciosa, fue propuesta en 1924 por el bioquímico ruso Aleksandr Oparin (Oparin, 1924), basada en los conocimientos que se tenían en esa época sobre la composición de la atmósfera primitiva (principalmente nitrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono, metano y amoníaco), y sugiriendo que gracias a la acción de las descargas en las tormentas eléctricas y la luz ultravioleta del sol, estos componentes en altas concentraciones en estanques poco profundos, se convertirían y reformarían en aminoácidos, los componentes básicos de la vida, iniciando de algún modo un proceso evolutivo, siguiendo la hipótesis planteada por el Darwinismo.

En la década de 1950, las teorías de Oparin fueron puestas a prueba por el bioquímico estadounidense Harold Urey y su estudiante Stanley Miller mediante la construcción de un dispositivo con una mezcla de componentes tratando de emular la atmósfera primitiva, la cual fue sometida a descargas eléctricas continuas de 60,000 volts. En poco tiempo Miller fue capaz de encontrar moléculas orgánicas complejas como la urea, el ácido acético, alcoholes y lípidos, e incluso algunos azúcares (Miller, 1955). Los trabajos de Urey y Miller desataron una gran cantidad de investigación en esa incipiente área de la ciencia durante aquellos años, conocida

actualmente como química prebiótica. Sin embargo, en este experimento la composición de la atmósfera primitiva propuesta por Miller es su punto débil, ya que al modificar ligeramente su contenido, pasando a una composición un poco más neutra, se puede modificar de forma apreciable la formación efectiva de aminoácidos y viceversa (Cleaves et al., 2008). Sin embargo, si bien es cierto que moléculas fundamentales para la vida han aparecido en estos experimentos, aún no es del todo claro cómo pudieron aparecer de forma espontánea procesos dinámicos tales como la vida, a partir de sistemas aislados con una serie de reacciones químicas, dado que estos sistemas siempre se mueven hacia estados de equilibrio termodinámico, para los cuales la energía libre de Gibbs (definida como $G = E + PV - TS$, donde E es la energía interna, P la presión, V el volumen, T su temperatura y S la entropía asociada) requerida para la formación y existencia de las moléculas complejas de la vida, es minimizada en estas condiciones (Springsteen and Joyce, 2004).

El problema del origen y evolución de la vida, tomó un matiz multidisciplinario en 1944 cuando el físico alemán Erwin Schrödinger, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, publicó su libro titulado *What is life?* (Schrödinger, 1944), en el cual intentó describir el origen de la vida desde una perspectiva tanto biológica como física. En dicho texto se incluye un análisis de los trabajos de Delbrück y Muller sobre las mutaciones producidas en las moscas de la fruta y como éstas se incrementan al aumentar la temperatura y usar radiación ionizante (previo al descubrimiento del DNA y RNA por Watson y Crick, inspirados por los datos de Rosalind Franklin). Schrödinger sugirió que el material genético debería tener una estructura cuasi periódica, para ser capaz de guardar información. Asimismo, discutió la interesante hipótesis, originalmente propuesta por Boltzmann, de que la estructuración de la vida consume entropía (negativa), en otras palabras, sugiere que la disipación de la energía a través de materia orgánica conduce a la estructuración material, logrando a partir de esto una mayor disipación y complejidad. Sin embargo, la mayor contribución de Schrödinger fue la de alentar a los físicos a estudiar el origen de la vida, que previamente había sido considerado un tópico demasiado complicado para ser estudiado al nivel de leyes físicas fundamentales.

Para concluir con esta breve introducción sobre el estudio del origen y evolución de la vida, cabe mencionar que la vida como la conocemos en la tierra, es un proceso dinámico que ocurre fuera del equilibrio termodinámico. El estudio de la misma, por consiguiente, debe ser abordado desde una perspectiva de termodinámica de no-equilibrio y multidisciplinaria; entre la física, la química y la biología.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la sección anterior se presentaron algunas de las diversas hipótesis científicas del origen de la vida, ninguna exenta de problemas y puntos débiles. Recientemente, ha surgido una nueva teoría del origen de la vida, basada en las ideas del físico y químico belga Illiya Prigogine sobre las llamadas estructuras disipativas (Prigogine, 1961), las cuales son estructuras que se autoorganizan de forma

coherente en regímenes alejados del equilibrio termodinámico, indicando que la disipación de la energía y materia (de forma contraintuitiva, ya que usualmente esto se asocia más bien con la evolución de los sistemas hacia estados más desordenados) lejos del equilibrio, se convierte en una fuente de orden. Esta teoría se centra en estudiar el incremento global de la producción de entropía de la tierra primitiva en su ambiente solar, a través de la disipación de luz solar en la banda UV y el espectro visible debido a las moléculas orgánicas, sugiriendo que esta disipación está detrás del origen de la vida (Michaelian, 2009, 2011b, Michaelian, 2012b). Más allá, se puede extender la teoría de los fenómenos disipativos para considerar la estabilidad de las poblaciones y la dinámica de ecosistemas dentro del marco de la termodinámica de Prigogine, solo que a esta escala, los individuos de cada especie se consideran como las unidades de producción e intercambio de entropía; los ecosistemas fuera del equilibrio pasan por análogos a las transiciones de fase, provocados por cambios repentinos en las restricciones y constricciones externas dado un punto crítico (Michaelian, 2005).

El estudio del origen y evolución de la vida a partir del paradigma termodinámico, se centra en que el proceso de disipar la luz del sol en calor llevado a cabo por las moléculas orgánicas (por ejemplo, los pigmentos orgánicos) presentes en la biosfera, particularmente cuando se encuentran disueltos en agua, y ligados con ciertos procesos abióticos (tales como el ciclo del agua). Esta disipación es la responsable de la mayor fuente de producción de la entropía en la tierra. Por lo tanto, la vida bajo esta aproximación, realiza una importante función termodinámica: la de actuar como un catalizador dinámico, y que en conjunto con procesos no-biológicos, producen entropía (Michaelian, 2009, 2011b, 2012a, 2012b).

La existencia de la no linealidad entre los flujos generalizados y las fuerzas derivadas de un potencial externo impuesto, proporciona a la materia del sistema numerosas soluciones posibles para los estados de no equilibrio estacionarios relajados en el tiempo. Estas soluciones por lo general corresponden a organizaciones materiales estables pero dinámicas, o a procesos de baja entropía pero alta producción de entropía, involucrando una ruptura en la simetría del espacio y el tiempo (estructuración material), rumbo al cual, de todas las soluciones estables, el sistema evolucionará. Ésto depende de las condiciones iniciales y de las fluctuaciones microscópicas particulares en el punto de bifurcación, dando lugar a las diferentes soluciones. Por otra parte, esto da a los procesos físico-químicos una historia evolutiva particular, generalmente a través de estados de mayor producción global de entropía.

Ejemplos comunes de la estructuración disipativa que ocurren en sistemas mantenidos fuera del equilibrio por un potencial químico generalizado externo son los rompimientos de las simetrías espaciales en las células de convección y el rompimiento de los patrones y las simetrías espaciales y temporales de un oscilador químico de Belousov-Zhabotinsk; la primera surge en los sistemas de conducción-convección mantenidos bajo efectos gravitacionales en un gradiente de temperatura impuesto, mientras que el segundo surge en sistemas de difusión-reacción bajo afinidades químicas impuestas. La estructuración en ambos tipos de sistemas tie-

ne un límite de tamaño inferior debido a las longitudes características finitas de difusión. Para sistemas biológicos en un solvente acuoso, el tamaño mínimo de las estructuras disipativas de estos procesos es del orden de micrómetros (Hess and Mikhailov, 1994). Sin embargo, la estructuración disipativa puede ocurrir también a una escala menor, inclusive a nivel nanométrico, la misma a la que muchos procesos ocurren dentro de las células vivas. Un ejemplo de esto son los motores moleculares, como aquellos que promueven el avance de la polimerasa durante la extensión de DNA o RNA (Bustamante and et al., 2005), o también los procesos de formación de enlaces de péptidos entre aminoácidos conocido como traslación, y que se llevan a cabo en los ribosomas de las células. Por lo tanto, deben existir otros mecanismos disipativos además de la conducción-convección y difusión-reacción operando a un nivel microscópico y que den lugar a los procesos irreversibles microscópicos y a la estructuración disipativa dentro de las células.

A escalas nanométricas, particularmente para materia (biológica) blanda, los enlaces covalentes fuertes direccionales, permiten transiciones moleculares, por ejemplo entre diferentes estados isoméricos, tautoméricos o estados cambiados de la molécula. También está la posibilidad de transiciones entre diferentes estados electrónicos, rotacionales o vibracionales, al igual que entre diferentes orientaciones de momentos dipolares eléctricos o magnéticos bajo campos eléctricos o magnéticos externos impuestos, o también entre complejos moleculares o inclusive separación de fases microscópicas (gas-líquido-sólido). Estas transformaciones están relacionadas a los grados de libertad internos de la molécula, o complejos moleculares, los cuales están disponibles para la formación microscópica de estructura que pueden fomentar la disipación del potencial externo impuesto.

Las reacciones (o difusiones) químicas o fotoquímicas, junto con las posibles transiciones estructurales moleculares internas mencionadas previamente, pueden llevar a la estructuración a escala nanométrica a través de la disipación de un potencial termodinámico generalizado. Este nuevo campo de investigación es llamado estructuración disipativa microscópica, aunque Prigogine (Prigogine, 1961) ya había estudiado formalmente el problema a través de un análisis de los grados de libertad internos del sistema, fue hasta hace poco que recibió la atención debido a su potencial aplicación a la nanotecnología. La innovación de la estructuración inducida por disipación a escala nanométrica es que esta puede persistir inclusive después de la remoción del potencial químico generalizado externo, esto se debe a que los átomos y moléculas tienen problemas para moverse lo cual resulta de las fuertes interacciones interatómicas, y que por tanto, pueden ser usados en un gran número de aplicaciones prácticas, donde una estructuración nanométrica controlada, sea requerida (Hess and Mikhailov, 1994, Tetsuro et al., 2009, Soejima et al., 2014).

Los procesos inducidos por fotones, frecuentemente se asocian con la formación microscópica de estructuras disipativas, ya que éstos pueden entregar localmente una gran cantidad de energía de baja entropía en una pequeña cantidad de materia. Esto lleva a fuerzas generalizadas muy grandes en dimensiones microscópicas, las cuales promueven la autoorganización como una respuesta termodi-

námica para disipar el potencial fotónico aplicado. En particular, las resonancias cuánticas pueden llevar a las transformaciones moleculares mencionadas previamente, las cuales a través de su naturaleza disipativa o probabilística de decaimiento, rompen la reversibilidad clásica (Prigogine and Stengers, 1997) por una cantidad que depende a su vez de la cantidad de energía en el fotón y de la interacción entre los átomos involucrados en la absorción (Lucia, 2014). Actualmente existen muchos ejemplos en biología que utilizan transformaciones disipativas moleculares inducidas por fotones a nivel cuántico (e.g., Schulten and Hayashi, 2014). Un ejemplo claro de la estructuración disipativa encontrado en muchas de las moléculas fundamentales de la vida son las intersecciones cónicas (ver Figura 3).

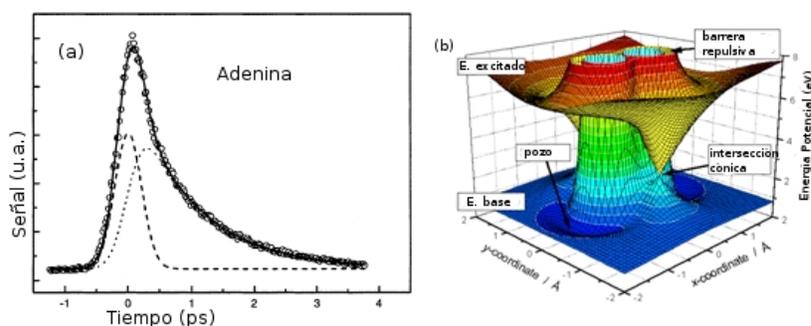


Figura 3: a) Decaimiento rápido (en picosegundos) del estado excitado de adenina, base de ARN y ADN, irradiado por luz UV a 260 nm. Tomado de Kang et al. (2002). b) Representación esquemática de la intersección cónica de la adenina que permite la disipación rápida en calor de excitaciones electrónicas debida a un acercamiento en energía de los estados vibracionales del estado electrónico excitado con los estados vibracionales del estado base por una ligera deformación de las coordenadas atómicas de la molécula. Reproducción con permiso de “Intrinsic Lifetimes of the Excited State of DNA and RNA Bases”, Hyuk Kang et al.. Copyright (2002) American Chemical Society.

En nuestro grupo de trabajo pretendemos estudiar la estructuración microscópica disipativa de las moléculas fundamentales en el origen de la vida mediante el uso de las herramientas de la termodinámica y la mecánica estadística fuera del equilibrio, en los rangos de validez que restringe la teoría existente según el estado del sistema. Estudiaremos ejemplos particulares que pudiesen llevarnos a respuestas respecto al origen de la vida. Nuestra intención es la de construir y desarrollar un marco basado en la termodinámica y la mecánica estadística fuera del equilibrio para el estudio de la estructuración microscópica de las moléculas de la vida. Asimismo, nos interesa extender nuestro conocimiento de los sistemas biológicos macroscópicos mediante el estudio de la termodinámica extendida y de la mecánica estadística fuera de equilibrio. En el presente capítulo, solo se presentan breves

resúmenes de trabajos terminados o en proceso de elaboración hecho por nuestro grupo dentro las diferentes áreas relacionadas con el origen y evolución de la vida. Para más detalles, sugerimos que el lector consulte los artículos correspondientes anotados.

ÁREAS DE TRABAJO

Explicación termodinámica de la ubicuidad cósmica de pigmentos orgánicos

Existe evidencia sólida de la presencia de grandes cantidades de material orgánico en el cosmos, particularmente en forma de compuestos aromáticos. Estas moléculas se pueden encontrar en la superficie de la Tierra y Marte, en las atmósferas de los planetas más grandes y en muchos de sus satélites, en asteroides, cometas, meteoritos, las atmósferas de gigantes rojas, nebulosas interestelares y en los brazos espirales de las galaxias. Se espera que muchos de estos entornos sean de baja temperatura y presión, lo que implica que la energía libre de Gibbs para la formación de estas moléculas complejas debería ser positiva y grande, lo que sugiere que su existencia solo se puede atribuir a la termodinámica de procesos de no equilibrio. En el artículo publicado relacionado con este tema (Michaelian y Simeonov, 2017), primero revisamos la evidencia de la abundancia de estas moléculas orgánicas en el cosmos y luego describimos cómo la ubicuidad se puede explicar desde el marco de la termodinámica del no-equilibrio en base a las propiedades catalíticas de estas moléculas de pigmentos para la disipación de fotones de estrellas vecinas cuyos espectros de emisión se encuentran en el ultravioleta y el visible, lo que lleva a una mayor producción de entropía local. Una relación entre el máximo de longitud de onda de absorción de estos pigmentos orgánicos y el correspondiente entorno de fotones estelares proporciona una guía para determinar qué compuestos aromáticos son más probables de encontrar en un vecindario estelar dado, un postulado que puede ser verificado en la Tierra. Se sugiere que al menos parte de la materia oscura bariónica se puede asociar con estas moléculas que emiten en el infrarrojo extremo con muchas líneas de emisión, aunque débiles, por lo que hasta el momento escapan a la detección. Esta explicación termodinámica para la ubicuidad de dichas moléculas orgánicas también tiene relevancia para la posibilidad de detectar vida en otras regiones del universo. Para conocer más de esta perspectiva, favor de consultar la referencia (Michaelian y Simeonov, 2017).

Estructuración disipativa microscópica y proliferación en el origen de la vida

Se sugiere que algunas moléculas fundamentales de la vida se formaron, proliferaron y evolucionaron a través de la estructuración disipativa microscópica fotoquímica y autocatalítica bajo radiación solar en el UVC/UVB prevalente en la superficie de la Tierra a lo largo del periodo Arqueano. La evidencia se da en las numerosas características sobresalientes de estas moléculas, incluyendo su fuerte absorción en esta región espectral y su rápido decaimiento no radiativo del estado excitado a través de intersecciones cónicas inherentes (ver Figura 3). En este

trabajo, presentamos los ejemplos de la estructuración disipativa y la proliferación disipativa de las purinas y del ADN monocatenario. El estado estacionario inducido por luz UVC y UVB a través de las isomerizaciones y tautomerizaciones son cruciales para la formación de las purinas a partir de cianuro de hidrógeno en un ambiente acuoso bajo luz UVC. La fosforilación de nucleósidos inducida por luz UVC y la desnaturalización de ARN y ADN de doble hélice son similarmente importantes para la producción y proliferación del ADN monocatenario. Esta perspectiva de disipación termodinámica proporciona una base físico-química para el entendimiento del origen y la evolución de la vida. Para conocer más de esta perspectiva, favor de consultar la referencia (Michaelian, 2017).

La desnaturalización del ADN inducida por fotones: una posible vía disipativa para la replicación no enzimática en el Arqueano

La termodinámica del no-equilibrio proporciona un marco prometedor desde el cual abordar las formidables dificultades encontradas para explicar el origen de la vida, incluyendo; la proliferación y polimerización de nucleótidos, replicación no enzimática de ARN y ADN así como su evolución (incluida la adquisición de homociralidad e información). Una propuesta desde este marco es que el origen de la vida fue impulsado por la disipación del flujo de fotones solares UVC en la superficie de la tierra. Aquí presentamos evidencia experimental de que la absorción y disipación de luz UVC por ADN a temperaturas inferiores a su temperatura de fusión conduce a la desnaturalización completa y reversible para ADN sintético pequeño de 25 pares de bases (pb), y a desnaturalización parcial y reversible para ADN sintético de 48 pb y para ADN de levadura y esperma de salmón de grandes tamaños medio de 100 kbp. Estos resultados sugieren que la desnaturalización inducida por fotones UVC, pudo haber formado parte de una ruta disipativa hacia la replicación del ADN sin enzimas en el origen de la vida, y también pudo haber proporcionado un mecanismo simple para la acumulación temprana de homociralidad e información en estas moléculas. Se proponen tentativamente varios mecanismos posibles para la desnaturalización del ADN inducidos por luz UVC. Para conocer más de esta perspectiva, favor de consultar la referencia (Michaelian y Santillán, 2014).

Origen de la codificación de información en ácidos nucleicos a través de un relación disipación-replicación

La luz ultravioleta incidente en material orgánico puede iniciar su estructuración disipativa espontánea en cromóforos que luego pueden catalizar su propia replicación. Este pudo haber sido el caso de uno de los cromóforos más antiguos de todos los que disipan el flujo de fotones UVC en el Arqueano, los ácidos nucleicos. Bajo el imperativo empíricamente establecido de aumentar la producción de entropía, los ácidos nucleicos con afinidad a los aminoácidos particulares que fomentan la disipación de fotones UVC, habrían sido "termodinámicamente seleccionados"

a través de esta relación de disipación-replicación. De hecho, aquellos aminoácidos con características más relevantes para fomentar la disipación de fotones UVC son precisamente aquellos con mayor afinidad a sus codones o anticodones. Esto podría proporcionar un mecanismo físico-químico para la acumulación de información en ácidos nucleicos relevante para la disipación del potencial fotónico impuesto externamente. Este mecanismo podría proporcionar una base termodinámica de no-equilibrio, basado en la creciente producción de entropía global de la biosfera, para la selección natural darwiniana. En este trabajo, mostramos cómo este mecanismo pudo haber comenzado a funcionar en el origen de la vida en el Arqueano, y cómo, de hecho, todavía funciona hoy en día, aunque indirectamente a través de vías biosintéticas complejas que ahora operan en el visible. Para conocer más de esta perspectiva, favor de ver la referencia (Mejía y Michaelian, 2018).

Estructuración fotoquímica disipativa de las vesículas de ácidos grasos del Arqueano

La estructuración prebiótica de los ácidos grasos, su afiliación en vesículas y su posterior asociación con otras moléculas fundamentales de la vida, como ARN y ADN para formar las protocélulas más antiguas, se describe mediante estructuración fotoquímica disipativa bajo el potencial de fotones UVC solar prevalente en la superficie de la Tierra durante el periodo del Arqueano. El ácido nonanoico de nueve carbonos, $C_9H_{18}O_2$, altamente activo en la superficie, resulta de la estructuración fotoquímica disipativa de luz UVC en agua saturada de CO y CO_2 . La polimerización inducida por UVC de estos lípidos puede conducir a vesículas de ácidos grasos conjugados reticulados de cadena larga (ácido linolénico C18:3n-3 y ácido parénico C18:4n-3) estables a las altas temperaturas (85 °C) y a valores de pH poco ácidos (6.0-6.5) en la superficie del océano Arqueano, también resistentes a la floculación del catión divalente, permeables a iones y pequeñas moléculas cargadas pero impermeables a oligos de ADN y ARN corto, y lo que es más importante, altamente disipativo en región UVC entre 220 y 290 nm. La asociación de estas vesículas con las intersecciones cónicas de ARN y ADN para la disipación rápida (ver Figura 2), y la posterior incorporación de fosfolípidos y carotenoides en las paredes de estas vesículas también se considera desde la perspectiva de la estructuración disipativa. Para conocer más de esta perspectiva, favor de consultar la referencia (Michaelian y Rodríguez, 2018).

La homoquiralidad a través de la desnaturalización inducida por fotones de ARN / ADN en el origen de la vida

Dado que una mezcla racémica de nucleótidos quirales frustra la extensión sin enzimas de ARN y ADN, el origen de la homoquiralidad debe estar íntimamente relacionado con el origen de vida. Las teorías sobre homoquiralidad han elegido suponer mecanismos abióticos para el enriquecimiento enantiómero prebiótico y amplificación posterior, pero ninguna, hasta ahora, ha sido generalmente aceptada. Aquí se presenta una nueva hipótesis para la obtención de homoquiralidad a

partir de una asimetría en la desnaturalización de ARN y ADN de forma derecho sobre izquierda, inducida por fotones polarizados circularmente en la superficie del océano Arqueano, cuando las temperaturas descendieron por debajo de la fusión del ARN y el ADN. Esta asimetría se atribuye a un pequeño exceso de luz submarina circular polarizada a la derecha durante la tarde, cuando en la superficie las temperaturas del agua eran más altas y por lo tanto más conducentes a la desnaturalización inducida por fotones, al igual que a una banda de dicroísmo circular negativo que se extiende de 230 a 270 nm para oligos pequeños de ARN y ADN. Debido a que los ácidos D-nucleicos tienen una mayor afinidad por el L-triptófano por la estereoquímica, y porque los complejos de D-ARN/ADN + L-triptófano tienen un dicroísmo circular negativo aumentada en una banda entre 230 y 270 nm, la homoquiralidad del triptófano también puede explicarse por esta hipótesis. Se presenta un modelo numérico que demuestra la eficacia de dicho mecanismo en procurar la homoquiralidad del ARN o ADN a partir de una solución racémica original en tan solo 270 años años. Para conocer más de esta perspectiva, favor de consultar la referencia (Michaelian, 2018).

Catálisis biológica del ciclo hidrológico

La teoría darwinista describe la vida como abrumadoramente consumida por una lucha por la supervivencia en un ambiente hostil. Sin embargo, desde una perspectiva termodinámica, la vida es un proceso dinámico fuera del equilibrio, estabilizador y coevolucionando con su entorno abiótico. Los componentes vivos de la biosfera en la superficie de la Tierra de mayor biomasa, las plantas y las cianobacterias, están involucradas en la transpiración de una gran cantidad de agua. La transpiración es parte del ciclo global del agua, y es este ciclo el que distingue a la Tierra de su aparente vida estéril de sus planetas vecinos, Venus y Marte. La disipación de luz solar en calor por moléculas orgánicas en la biosfera, y su acoplamiento al ciclo del agua (así como otros procesos abióticos), es, por mucho, el mayor proceso de producción de entropía que ocurre en la Tierra. La vida, desde esta perspectiva, desempeña una importante función termodinámica; actúa como un catalizador dinámico para ayudar a procesos abióticos irreversibles como el ciclo del agua, huracanes y las corrientes oceánicas y eólicas para producir entropía. El papel de los animales desde este punto de vista es el de inconscientemente servir a las plantas y cianobacterias, ayudándolas a crecer, y a extenderse en áreas inicialmente inhóspitas. Para conocer más de este perspectiva, favor de consultar las referencias (Alonso Chávez y Michaelian, 2011, Michaelian, 2012, Michaelian, 2015).

Estabilidad termodinámica de ecosistemas

La estabilidad de los ecosistemas durante los períodos de estasis en su trayectoria macroevolutiva, se estudia desde la perspectiva la termodinámica del no-equilibrio. Los individuos que conforman a las diversas especies se consideran unidades de producción de entropía e intercambio de entropía en un sistema termodi-

námico abierto. En el marco de la teoría clásica de la termodinámica irreversible, y bajo la condición de las restricciones externas constantes, dicho sistema evolucionará naturalmente hacia un estado estacionario termodinámico globalmente estable. En este trabajo, sugerimos que el estado estable ecológico, o estasis, es un caso particular del estado estacionario termodinámico, y que la evolución de la estabilidad de la comunidad a través de la selección natural es una manifestación de directivas termodinámicas de no-equilibrio. Además, se argumenta que la puntuación de estasis que conduce a la sucesión del ecosistema, puede ser una manifestación de termodinámica de no-equilibrio por ejemplo, "transiciones de fase" provocadas por un cambio de restricciones externas a través de un punto crítico termodinámico. Más de esta perspectiva puede ser encontrada en la referencia (Michaelian, 2012, 2015).

CONCLUSIONES

El estudio del origen y evolución de la vida indica que la vida, como la conocemos en la tierra, es un proceso disipativo dinámico y que ocurre fuera del equilibrio termodinámico, y debe ser abordado desde una perspectiva multidisciplinaria, entre la física, la química y biología. En este trabajo hemos delineado un marco sólido para el estudio del origen de la vida y su evolución a partir de los conceptos de la teoría termodinámica irreversible clásica y basada en la tendencia observada en la naturaleza, es decir la de aumentar la disipación global del potencial de fotones impuesto externamente. Queda mucho camino por recorrer y nuestro grupo da la bienvenida a mentes inquisitivas dispuestas a trabajar arduamente para resolver uno de los rompecabezas más complejos de la ciencia actual.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la ayuda financiera otorgada por DGAPA-UNAM PAPIIT (proyecto IN103113 y IN102316) en la realización de este trabajo. O.R. agradece una beca de maestría otorgado por DGAPA-UNAM y otra por el Programa Nacional de Posgrado de Calidad, CONACYT.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso Chávez V. y Michaelian K. *Predicting Ecosystem Response to Perturbation from Thermodynamic Criteria*. J. Mod. Phys., 2, 26, 627-635, 2011.

Bustamante et al. *Natural selection on protein coding genes in the human genome*. Nature, 437:1153-1156, 2005.

Callen H. B. *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics*. John Wiley and Sons, 1985.

Cleaves H. J., Chalmers J. H., Lazcano A., Miller S. L., y Bada J. L. *A reassessment of prebiotic organic synthesis in neutral planetary atmospheres*. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 38(2):105-115, 2008

Darwin C. *On the origin of Species by Means of Natural Selection*. Ed. J. Murray, London, 1859

Groot S. D. y Mazur P. *Non-equilibrium Thermodynamics*. Willey, New York, 1969 .

Hess B. y Mikhailov A. *Self-organization in living cells*. *Science*, 264(5156):223-224, 1994.

Lebon G., Jou, D. y Casas-Vazquez J. *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics*. Springer-Verlag, 2008.

Lucia, U. *Electron-photon interaction and thermal disequilibrium irreversibility*. *International Journal of Quantum Foundations*, 3(3):24-30, 2014.

Michaelian K. *Thermodynamic stability of ecosystems*. *Journal of Theoretical Biology*, 237(3):323-335, 2005.

Michaelian K. *Entropy production and the origin of life*. *Journal of Modern Physics*, 2(6A):595-601, 2011a.

Michaelian K. *Thermodynamic dissipation theory for the origin of life*. *Earth System Dynamics*, 2(1):37-51, 2011b.

Michaelian K. *The biosphere: A thermodynamic imperative*. En: Ishwaran, N., editor, *The Biosphere*, chapter 3. Intech Open, Rijeka, 2012a

Michaelian K. *Hess opinions Biological catalysis of the hydrological cycle: life's thermodynamic function*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8):2629-2645, 2012b.

Michaelian K., Santillán Padilla N. *UVC photon-induced denaturing of DNA: A possible dissipative route to Archean enzyme-less replication*. *Heliyon* 5, e01902 2019, y ibid bioRxiv [Biophysics], 2014.

Michaelian K. *Photon Dissipation Rates as an Indicator of Ecosystem Health*, paginas 15-36 del libro "Environmental Indicators", Eds. Robert Armon y Osmo Hänninen, Springer-Verlag, Dordrecht, Netherlands, 2015.

Michaelian K. *Thermodynamic Dissipation Theory of the Origin and Evolution of Life: Salient characteristics of RNA and DNA and other fundamental molecules suggest an origin of life driven by UV-C light*. Self published. Printed by CreateSpace, Mexico City,

ISBN: 9781541317482, DOI: 10.13140/RG.2.1.3222.7443, 2016.

Michaelian K. *Microscopic dissipative structuring and proliferation at the origin of life*. Heliyon, 3(e00424), 2017.

Michaelian K. y Simeonov, A. *Thermodynamic explanation for the cosmic ubiquity of organic pigments*. J. Astrobiology and Outreach, 5(1):7-9, 2017.

Michaelian K. y Rodríguez, O. *Dissipative photochemical structuring of archean fatty acid vesicles*. Aceptado para publicación en la Revista Cubana de Química, 2019.

Miller S. L. *Production of some organic compounds under possible primitive earth conditions*. Journal of the American Chemical Society, 77(9):2351-2361, 1955.

Morel R. E. y Fleck G. *Onsager's principle: A unifying bio-theme*. Journal of Theoretical Biology, 136(2):171-175, 1989.

Onsager L. *Reciprocal relations in irreversible processes. I*. Phys. Rev., 37:405-426, 1931a.

Onsager L. *Reciprocal relations in irreversible processes. II*. Phys. Rev., 38:2265-2279, 1931b.

Oparin A. *The origin of life*. English translation by Ann Synge (1936). Proiskhozhdenie zhizny. Moscow. Izd. Moskovhii Rabochi, 1924.

Prigogine I. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. Interscience, New York, 1961.

Prigogine I. y Stengers, I. *The End of Certainty*. The Free Press, New York, 1997.

Sagan C. *Ultraviolet selection pressure on the earliest organisms*. Journal of Theoretical Biology, 39(1):195-200, 1973.

Schrödinger E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press, 1944.

Schulten K. y Hayashi, S. *Quantum biology of retinal*, page 237-263. Cambridge University Press, 2014.

Soejima T., Amako Y., Ito S., y Kimizuka N. *Light-reducible dissipative nanostructures formed at the solid liquid interface*. Langmuir, 30(47):14219-14225. PMID: 25370594, 2014.

Springsteen G. y Joyce G. F. *Selective derivatization and sequestration of ribose from a*

prebiotic mix. Journal of the American Chemical Society, 126(31):9578-9583. PMID: 15291561,2004.

Tetsuro S., Masa-aki M., y Nobuo K. *Holey gold nanowires formed by photoconversion of dissipative nanostructures emerged at the aqueous organic interface*. Small, 5(18):2043-2047, 2009.

ANÁLISIS ELEMENTAL DE AEROSOLES ATMOSFÉRICOS: LO QUE PODEMOS APRENDER DE ELLOS

*Javier Miranda** y *Valter A. Barrera[†]*

INTRODUCCIÓN

LA contaminación atmosférica es un problema global que comprende muchos aspectos y que está directamente asociado al cambio climático. Con la finalidad de conocer todas estas facetas se necesita la suma de esfuerzos de grupos técnicos y científicos. Todos ellos han desarrollado métodos que permiten el estudio de los contaminantes de una manera más eficiente y confiable que en el pasado.

Uno de los contaminantes más importantes son los aerosoles atmosféricos. Éstos pueden definirse como partículas sólidas o líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera. Sin embargo, el término se aplica más bien a partículas cuyas dimensiones son menores que 50 micrómetros (50 μm), y comúnmente a las que están entre 0.1 μm y 10 μm .

La importancia de los aerosoles se asocia con los diversos efectos que tienen en la naturaleza. Aunque se ha tratado de determinar si el bióxido de carbono de origen humano ha comenzado a producir el llamado efecto invernadero, los aerosoles atmosféricos no se han considerado por completo. Las partículas suspendidas podrían tener un efecto contrario, es decir, reducir la temperatura global, al dispersar y reflejar la radiación solar que incide sobre el planeta. Así pues, mientras no se conozca bien la presencia y composición de los aerosoles a nivel mundial, será muy difícil predecir si el efecto invernadero ocurrirá o no.

En los inicios del siglo XX, el estudio de los aerosoles sólo tenía relevancia para la Física, debido a que eran las partículas observables más pe-

* Departamento de Física Nuclear y Aplicaciones de la Radiación, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

[†]Laboratorio Nacional de Geoprocusamiento de Información Fitosanitaria (LaNGIF) Universidad Autónoma de San Luis Potosí

queñas de materia. Así, se pudieron explicar el movimiento Browniano y la difusión, Millikan midió la carga del electrón y se hicieron investigaciones de radiación ionizante. Hasta principios de los años setenta el propósito de su estudio cambió al observar los efectos tóxicos en la salud humana, la visibilidad, la vegetación, los edificios y monumentos. Esto ocurre principalmente en las grandes ciudades y en gente dentro de espacios ocupacionales industriales. Todo ello impulsó un rápido crecimiento de los métodos de control y captación industrial de los aerosoles. A partir de los años noventa, las aeropartículas se convirtieron en el objetivo de estudios dirigidos a determinar su influencia en la salud pública y los otros factores ya citados. Además, a raíz de la proliferación de partículas ultrafinas ($0.1 \mu\text{m}$), se han observado otros efectos en el clima del planeta.

Los aerosoles tienen propiedades físicas y químicas muy complejas, que varían ampliamente dependiendo de su origen y tamaño. Así, se pueden clasificar en función de su tamaño, masa, densidad, morfología y composición química. No obstante, el parámetro más relevante para identificar el comportamiento de los aerosoles es el tamaño de partícula. Todas las demás propiedades están fuertemente ligadas a éste, a pesar de que no es el único que las rige.

El tamaño de las partículas se expresa en términos del diámetro aerodinámico medio (DAM), definido como el diámetro de una esfera perfecta del mismo tamaño, con la densidad igual a la del agua, que presente la misma velocidad de sedimentación.

Los aerosoles tienen orígenes bastante diversos. Pueden crearse a partir de gases emitidos y otras moléculas de vapor, que pueden reaccionar químicamente en la fase gaseosa y posiblemente adsorberse dando inicio a una partícula. Ésta, a su vez, puede reaccionar ó transportarse a alguna capa de la atmósfera. Las partículas pueden coagularse con otras, crecer por la adsorción de otras moléculas o ser removidas por el arrastre de gotas de agua. También hay otras clases de aerosoles producidos por tormentas de polvo, volcanes o de origen mecánico y marino.

Una cierta fracción de las partículas tiene DAM menores que $10 \mu\text{m}$ y pueden penetrar por el tracto respiratorio humano. A estas partículas se les conoce como PM_{10} . Las más pequeñas (con DAM de alrededor de $2.5 \mu\text{m}$ o menores) tienen la posibilidad de llegar hasta los pulmones y depositarse en los alvéolos; se les denomina $\text{PM}_{2.5}$. Si las partículas contienen algún compuesto o elemento químico tóxico, es de esperar que haya daños a la salud de la persona que respire tales aerosoles.

Las fuentes emisoras también se pueden clasificar en naturales y antro-

pogénicas, es decir, humanas. Las naturales comprenden el polvo derivado del suelo y levantado por el viento, partículas que se desprenden del mar (o aerosoles marinos), material orgánico, erupciones volcánicas e incendios forestales, entre otras. Las fuentes antropogénicas abarcan las industrias, los automóviles, los incineradores domésticos, la quema intencional de campos y bosques, etc.

Hay diferencias básicas en las características de los aerosoles producidos por las diferentes fuentes. Por lo común, los aerosoles de origen natural tienen dimensiones mayores que 2.5 µm. Las aeropartículas antropogénicas son finas, es decir, presentan DAM menores que este valor. Más aún, las propiedades químicas son distintas, casi siempre, para cada fuente, hecho que de alguna manera funciona como su huella digital. Cabe señalar que las principales componentes de los aerosoles son compuestos orgánicos, nitratos, sulfatos y carbón elemental, que pueden representar hasta el 80 % de la masa total, dependiendo del sitio que se esté estudiando. Sin embargo, hay elementos químicos que aparecen únicamente en las emisiones de algunas fuentes y no en otras. En la Tabla 1 se muestran ejemplos de elementos producidos por fuentes representativas. Como puede verse, algunos de ellos son nocivos para la salud humana, la flora, la fauna (como el V, Cr, Ni, Zn, Pb), o que afectan la visibilidad (el caso del S).

Fuentes	Elementos
Suelo	Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr
Quema de biomasa	Cl, K
Automóviles (gasolina y frenos)	C, Cu, Zn, Br, Pb
Combustóleo	S, V, Ni
Quema de carbón mineral	S
Industrias, fundidoras	Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Pb
Sal marina	Na, Cl
Volcanes	S, Cl, K, Cu, Zn
Incineración de desperdicios	As, Br, Zn

Tabla 1: Fuentes y elementos encontrados en aerosoles atmosféricos.

Otro tipo de aeropartículas aparece cuando las que emitió originalmente una fuente (como podría ser el polvo del suelo), reacciona químicamente con otras partículas o con gases en la atmósfera. Esto produce lo que se conoce como aerosoles secundarios. En estos casos es mucho más difícil la asociación con una fuente específica.

MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE AEROSOLES

Los aerosoles se pueden estudiar desde muchos puntos de vista. Por ejemplo, uno de los aspectos más simples es la concentración de masa de las partículas por unidad de volumen de aire. Para esto se cuenta con equipos como el TEOM, empleado por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Este instrumento ofrece datos en tiempo real para que puedan consultarse en el sitio de internet de la RAMA.

Otra característica que es de interés es la morfología de las partículas, para conocer su origen pues, por ejemplo, no tienen la misma forma las partículas de origen orgánico (como el polen) que las emitidas por una fábrica o un automóvil. El método más ampliamente utilizado para esto es la microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).

Finalmente, es necesario determinar la composición química de las aeropartículas. Debido a que no existe un método analítico que proporcione un resultado completo acerca de dicha composición, es necesario recurrir a diversas técnicas, según el compuesto o elemento por examinar. Así, es posible recurrir a métodos tradicionales de análisis químico (como las titulaciones), que en general son poco sensibles y destructivos. Para el estudio de compuestos orgánicos la técnica más usual es la cromatografía, ya sea de iones o de líquidos. Los contenidos de carbono (elemental y orgánico) se miden a través de un método conocido como térmico-óptico, en el que se calienta la muestra hasta que se conviertan en vapor las partículas de cada tipo de carbón, pues tienen diferentes temperaturas de sublimación. Se mide la absorción de luz proveniente de un láser, que se asocia con la concentración del carbón en la muestra.

Para poder determinar los contenidos elementales en las aeropartículas se cuenta con un gran número de técnicas. Todas ellas ofrecen mejores resultados que otras para ciertos elementos, no existiendo una que arroje datos sobre todos los elementos sin destruir la muestra. Así pues, existen técnicas destructivas como la espectrometría por absorción atómica (AAS), la espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) y las espectrometrías derivadas del plasma acoplado inductivamente (ICP). Por otra parte, se cuenta con técnicas no destructivas como el análisis por activación con neutrones (NAA), el microanálisis con sonda de electrones (EPMA), la fluorescencia de rayos X (XRF) y la emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE). Esta última tiene la ventaja, por ser una técnica que usa haces de iones, de que al mismo tiempo se pueden aplicar otros métodos analíticos

que dan información sobre otros elementos que no es posible estudiar con PIXE. Las técnicas son lo suficientemente sensibles como para detectar concentraciones del orden de 1 microgramo de un elemento por cada metro cúbico de aire en el sitio.

Los métodos analíticos arriba mencionados proporcionan el contenido de los elementos químicos presentes en la muestra analizada. Según sea la técnica, se obtendrán datos sobre distintos elementos. El número de éstos que puede analizarse con cada técnica varía. Lo más común es que haya información acerca de los elementos cuyo número atómico va de 11 a 92, es decir, desde el sodio hasta el uranio. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que no proporcionan información sobre el estado químico de los elementos (es decir, qué compuestos se forman), sino sólo sobre la concentración de los elementos.

Para poder aplicar cualquiera de estas técnicas de análisis de aerosoles atmosféricos primero es necesario coleccionar muestras de ellos. Con este fin se han desarrollado una gran cantidad de dispositivos, cuya función, en general, es la de hacer pasar el aire a través de filtros, en los cuales se depositan las partículas. Los diseños han llegado a un punto tal en que es posible seleccionar el tamaño de las partículas que se depositan en los filtros, de lo cual se toma ventaja para analizar sólo las partículas que serían respirables por sus dimensiones. Más aún, los depósitos de partículas sobre el filtro son uniformes, de forma tal que analizar cualquier punto sobre la muestra debe ser representativo del total del depósito. La variedad de equipos utiliza flujos de aire que van desde 1 litro cada minuto hasta varios metros cúbicos cada minuto (equipos de altos volúmenes). Existen aparatos que, además, permiten hacer el muestreo como función del tiempo, es decir, van coleccionando automáticamente las muestras durante, por ejemplo, 6 h cada una, a lo largo de un período predeterminado.

También es necesario considerar el tipo de filtro a utilizar, pues no todos ellos son apropiados para ciertas técnicas. Los materiales más utilizados en los filtros son la fibra de vidrio, fibra de cuarzo, Teflon®, policarbonato y fibra de nitrocelulosa. La característica común entre todos ellos es que los constituyen elementos químicos ligeros, como hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, salvo los dos primeros tipos, que también contienen silicio. Esto permite, en general, extraer información sobre el resto de los elementos en las aeropartículas depositadas.

Un estudio de aerosoles atmosféricos en un sitio designado consiste casi siempre en una campaña que cubre cierto período de tiempo. Se muestrea, por ejemplo, diariamente o cada dos o tres días, durante 24 h. Dichos pe-

ríodos son frecuentemente estaciones del año o se hace continuamente para presentar informes cada cierto tiempo.

Normalmente, el resultado que se consigue con la aplicación de las técnicas analíticas es la cantidad de un elemento determinado por cada unidad de volumen de aire bombeado (metro cúbico, por lo común), o bien por cada unidad de masa del material colectado.

EL TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS

Como se explicó más arriba, el resultado del muestreo y el análisis dan como consecuencia un conjunto de datos de concentraciones elementales para una fecha determinada (o algún período más corto, según se haya planeado la campaña o el tipo de muestreador empleado). El primer producto alcanzado son las variaciones temporales de las concentraciones.

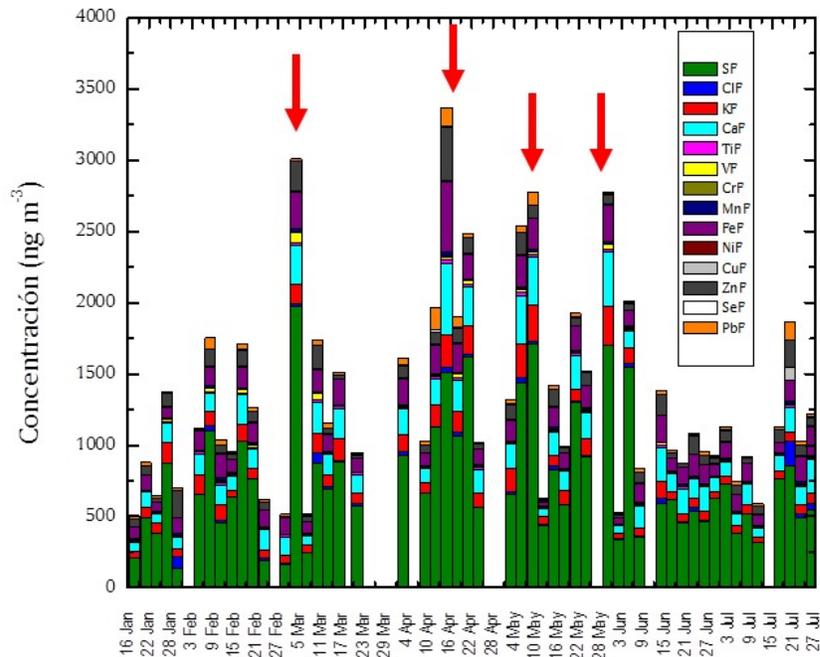


Figura 1: Serie de tiempo para las concentraciones elementales medidas en un sitio del norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, para $PM_{2.5}$ en el año 2002.

Un ejemplo se aprecia en la figura 1, en la que se muestran los resulta-

dos de un muestreo en la zona norte de la ZMCM en el año 2002. El análisis elemental se efectuó con la técnica PIXE. Las partículas fueron $PM_{2,5}$ depositadas en filtros de policarbonato. En esta figura, las flechas señalan días en los cuales las concentraciones fueron muy superiores al promedio; a estos días se les conoce como episodios. También se puede observar si el contenido de algún elemento cambia en promedio durante ciertos días de la semana, como por ejemplo algún trazador industrial por la actividad fabril. Con estudios a largo plazo, es posible conocer también el comportamiento según las estaciones del año.

El siguiente paso es el cálculo de las concentraciones promedio para cada uno de los elementos. Para algunos de ellos, como el plomo, existen normas oficiales que indican que la concentración media durante 24 h no debe rebasar cierto valor. Habitualmente, estos valores máximos permitidos se establecen tomando en cuenta posibles daños en la salud humana. Además, el valor promedio ayuda a saber si la contaminación en un sitio es mayor que en otro.

Así pues, en la Tabla 2 se presenta una comparación de las concentraciones promedio determinadas en tres sitios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, utilizando PIXE sobre muestras de $PM_{2,5}$, durante el primer semestre de 1994. Las cifras mostradas ahí, a las que se aplicó un método estadístico llamado análisis de varianza, permiten asegurar que las concentraciones de los elementos representativos son iguales (o al menos no distintos), salvo el plomo en Naucalpan, que es más elevado.

Elemento	UNAM	Naucalpan	Ecatepec
S	3.5 (0.3)*	2.6 (0.3)	2.7 (0.3)
V	0.037 (0.005)	0.038 (0.005)	0.032 (0.005)
Fe	0.35 (0.02)	0.37 (0.03)	0.24 (0.02)
Zn	0.09 (0.01)	0.13 (0.02)	0.10 (0.01)
Pb	0.12 (0.01)	0.25 (0.05)	0.10 (0.01)

* Los números entre paréntesis representan la incertidumbre estándar combinada.

Tabla 2: Concentraciones de algunos elementos (en $\mu g m^{-3}$), medidas en tres sitios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en 1994.

Como se explicó antes, los elementos hallados en los aerosoles atmosféricos provienen de diversas fuentes. El primer intento por saber si un ele-

mento tiene origen natural o por actividades humanas es el cómputo del llamado Factor de Enriquecimiento (FE). Este número se encuentra al considerar la concentración de un elemento hallado en la muestra con respecto a la que se encontraría en la corteza terrestre promedio o a la composición de un suelo local. Esta concentración necesita un elemento de referencia, que casi siempre son el silicio o el hierro, pues éstos están presentes en el suelo en grandes cantidades y sus concentraciones son fáciles de medir. Cuando el FE es del orden de 1, se considera que el elemento es de origen terrestre; si es mayor, se puede afirmar que es antropogénico, a menos que haya una fuente específica bien identificada, como el mar, un incendio o un volcán.

Tomando en cuenta que ciertos elementos se esperan en sólo uno o dos tipos de fuentes emisoras, es factible tratar de “reconstruir” la contribución de esas fuentes, conjeturando que sus emisiones tienen características químicas establecidas, es decir, sólo aparecen como determinados compuestos. De este modo, se pueden combinar las concentraciones de aluminio, silicio, potasio, calcio, titanio y hierro para ajustarlas a una contribución de polvo de suelo, suponiendo que estos elementos se observan como óxidos en dicho polvo. Igualmente ocurre con el potasio, que puede ser un trazador tanto del suelo como de humo (quema de biomasa). La concentración de potasio en el humo se puede calcular si se sustrae a la concentración de este elemento la parte correspondiente al suelo, valor que se obtiene a partir de la concentración de hierro. Para esto se usa la relación conocida de concentración de potasio a la de hierro en la corteza terrestre promedio. De esta manera, hay resultados como los mostrados en la figura 2, donde se grafica la concentración medida de potasio en humo (una variable conocida como NSK, del inglés *non-soil K*), en un período alrededor de las fiestas de Independencia en México, en el mes de septiembre de 2005. Se encuentra que esta cantidad es casi inexistente antes del 15 de septiembre, el valor se dispara ese día y luego vuelve a disminuir. El origen del humo, sin duda, son los fuegos artificiales que se queman en esas fechas.

Una vez que se ha medido un conjunto de concentraciones elementales en los aerosoles atmosféricos, puede plantearse la pregunta de cuáles son las fuentes que están contribuyendo a la contaminación en el sitio de interés. Para ello se han desarrollado métodos de diversa índole. Se puede suponer que se conoce la composición de las emisiones de una fuente y, a partir de variables meteorológicas como velocidad del viento, humedad relativa, temperatura y presión, hacer modelos que describan cómo se transportan los contaminantes desde la fuente. A estos modelos se les llama de dispersión. Por otra parte, se puede estudiar la contaminación en un sitio y,

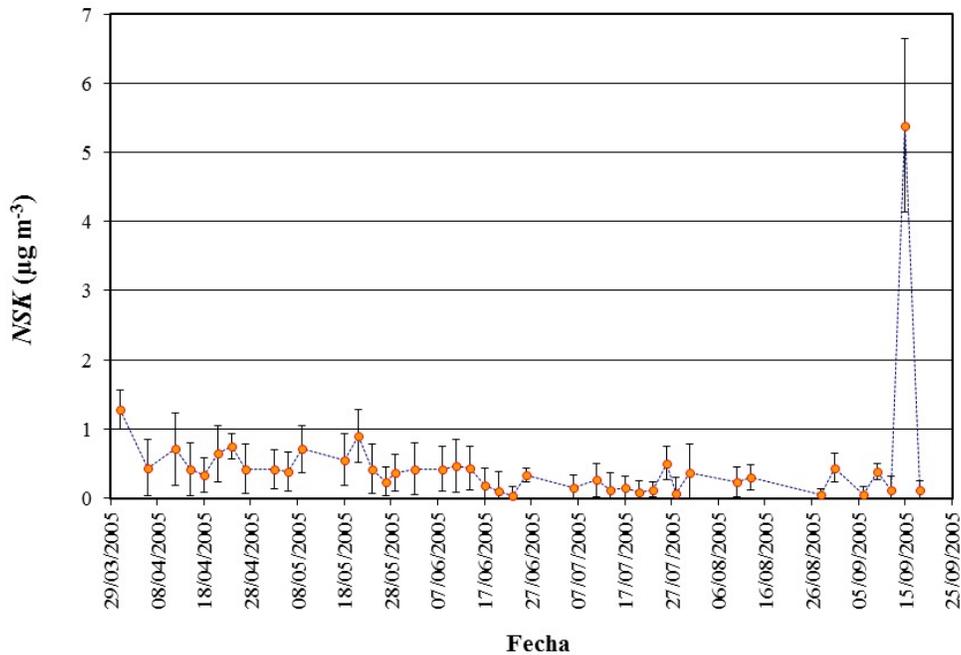


Figura 2: Concentración de potasio no proveniente del suelo (NSK) en el centro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, medida en $PM_{2.5}$ durante el año 2005. Es notable el pico del 15 de septiembre.

basándose en las mediciones en dicho lugar y las variables meteorológicas, construir un modelo que permita asociar cada contaminante a una fuente. A éstos se les llama modelos de receptor. La mayoría de estos últimos están fundamentados en la estadística multivariada.

La primera técnica estadística multivariada que puede citarse es el análisis de cúmulos. En él, se sigue un método gráfico basado en las correlaciones entre los diversos elementos medidos, con el fin de reconocer un agrupamiento entre los elementos. Un ejemplo se muestra en la figura 3, donde aparece uno de estos diagramas de cúmulos, conocido como dendrograma. Aquí se aprecian grupos definidos, que se asocian con cada una de las fuentes productoras de aerosoles que incluyen a los elementos encontrados. En el caso particular de la figura 3, se tienen grupos que abarcan el polvo derivado del suelo (Fe, Ti, Ca, Si, Al), fuentes industriales (Ni, V) y la quema de biomasa (K, S). La limitación principal de esta técnica, sin embargo, es que sólo dice qué fuentes podría haber, sin cuantificar la contribución de cada una de ellas al total de la masa medida.

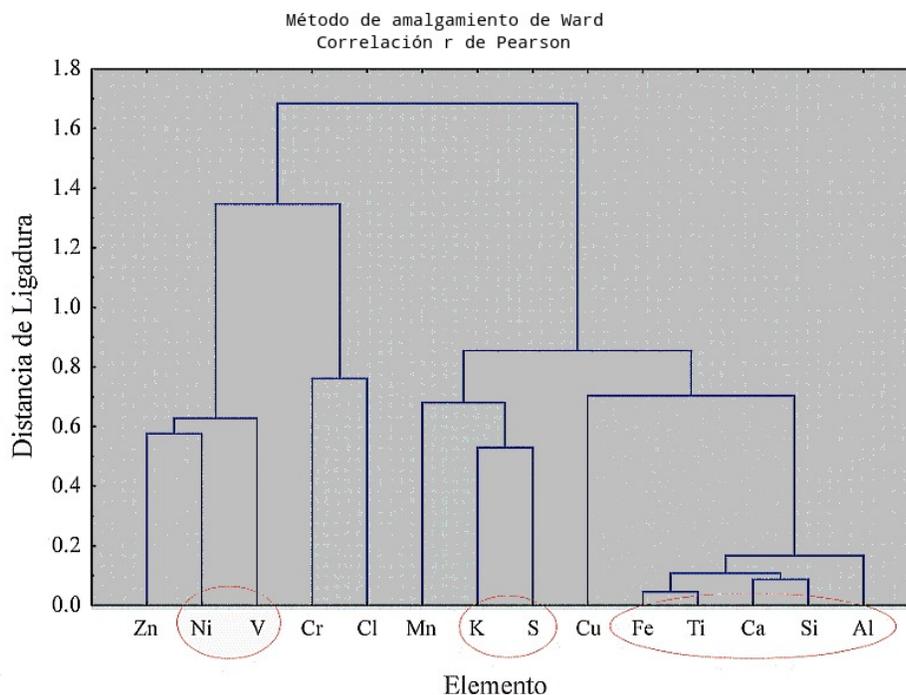


Figura 3: Dendrograma correspondiente a PM_{10} colectado en el norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, durante 2009. Las elipses muestran los principales grupos encontrados.

Una técnica estadística multivariada alternativa, mucho más poderosa desde el punto de vista cuantitativo que el análisis de cúmulos, es el análisis por componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés). En este caso se trabaja primordialmente con álgebra de matrices, dentro de un espacio vectorial de un número de dimensiones dado por el número de elementos de interés. El análisis por componentes principales lleva de ese espacio vectorial con muchas dimensiones a otro espacio de menor número de dimensiones, las cuales se identifican con las fuentes emisoras de los aerosoles. El método utiliza coeficientes de correlación lineal para hacer estas transformaciones. Entre las ventajas del método está el poder decir con cuánto contribuyen las fuentes al total de la masa medida. No obstante, se necesita un alto número de muestras para que los resultados sean significativos. Para ejemplificar los resultados obtenidos con análisis por componentes principales, se da la figura 4, la cual corresponde a un estudio de aerosoles analizados con PIXE y XRF, colectados en Cuajimalpa, D.F., en el invierno de

2004/2005. Aquí se aprecia que para la fracción gruesa (las partículas con DAM entre 10 μm y 2.5 μm) hay cuatro fuentes principales, mientras que para $\text{PM}_{2.5}$ sólo se hallan tres. Hay varios tipos de polvo del suelo y un factor de aerosoles secundarios (suelo con altos agregados de azufre). Para $\text{PM}_{2.5}$ hay contribuciones industriales, emisiones vehiculares y quema de biomasa.

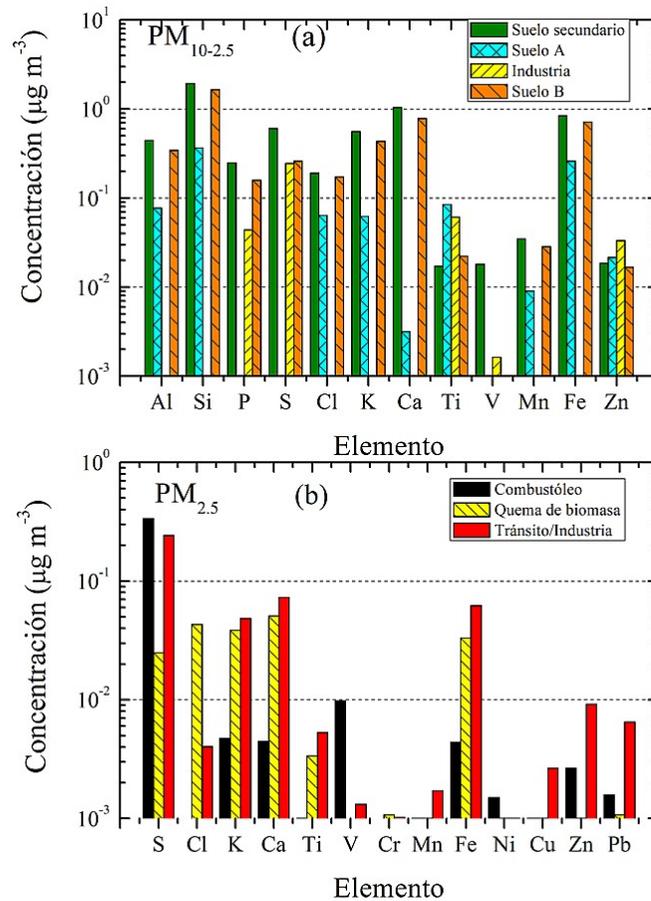


Figura 4: Contribuciones de fuentes en aerosoles atmosféricos colectados en Cuajimalpa, D.F., en 2004-2005.

Entre las desventajas de PCA está el hecho de que ocasionalmente las contribuciones predichas para algunos elementos son negativas (los de menores concentraciones), dado el principio matemático en el que se basa. Por

ello, con posterioridad se propuso un nuevo método estadístico conocido como Factorización de Matriz Positiva (PMF, por las siglas en inglés). Si bien los resultados son semejantes que con PCA, los resultados de PMF son más confiables porque se garantizan las contribuciones positivas. Un ejemplo de aplicación de PMF para encontrar las fuentes que contribuyen a la contaminación en un sitio se encuentra en la figura 5. Esto corresponde a una campaña de muestreo en el Centro de la ZMCM durante la primera mitad del año 2009. En esta ocasión se identificaron cinco fuentes, dos de las cuales se asocian directamente a polvo del suelo, otra de quema de biomasa, una más a emisiones industriales y finalmente otra de aerosoles de probable origen de suelo que reaccionó con el bióxido de azufre atmosférico, para producir aerosoles secundarios.

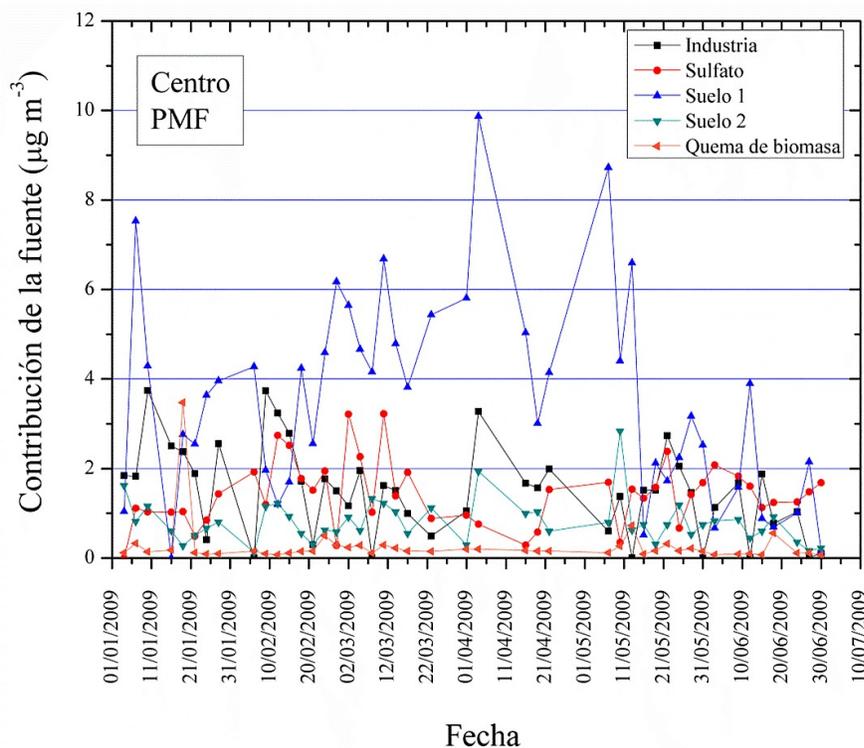


Figura 5: Series de tiempo para las fuentes identificadas con factorización de matriz positiva en aerosoles atmosféricos colectados en el Centro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en 2009.

Una posibilidad para corroborar los resultados de los análisis elementa-

les efectuados con técnicas como XRF o PIXE es el uso de haces con dimensiones microscópicas. A estas variantes se les conoce como microXRF o microPIXE. Tienen la ventaja de que se hacen análisis de partícula individual. Frecuentemente es impracticable una cuantificación; pero sí se comprueba con mayor certeza la aparición de partículas cuya composición se asemeje a las encontradas con los modelos de receptor PCA o PMF. Como muestra de esto se observan en la figura 6 los datos obtenidos de analizar una sección de la muestra colectada en uno de los episodios de la fuente “sulfato” en la figura 5. Los análisis con microPIXE demuestran que hay gran cantidad de partículas que corresponden a partículas de suelo con grandes añadidos de azufre.

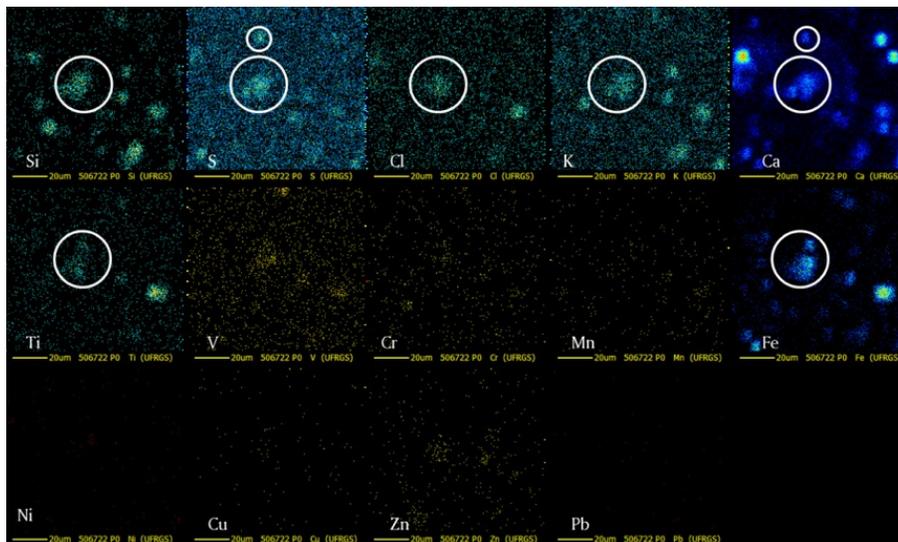


Figura 6: Mapeos elementales obtenidos con emisión de rayos X inducida por partículas a escala micrométrica para una muestra colectada en el Centro el 19 de enero de 2009. Los círculos grandes corresponden a una partícula conteniendo silicio, azufre, potasio, calcio, titanio y hierro, mientras que los círculos pequeños señalan una partícula con azufre y calcio.

Para completar el proceso de identificación de las fuentes, es posible recurrir a bases de datos y programas de simulación que pueden indicar la composición de las emisiones producidas por diversas fuentes, así como reconstruir el posible camino que siguieron las aeropartículas hasta llegar al sitio de muestro para ser colectadas en los filtros. Así, la manera de más fácil acceso y resultados muy satisfactorios es el uso del programa llamado

HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), desarrollado por la agencia estadounidense NOAA, al cual se tiene acceso gratuito. Este programa cuenta con bases de datos meteorológicos globales a lo largo de varios decenios. Con él es posible reconstruir las llamadas retro-trayectorias, que muestran el camino más probable que siguieron los aerosoles hasta el sitio del muestreo. Si las retro-trayectorias cruzan un punto considerado como posible fuente emisora, se explicarían los episodios en los factores identificados con PMF.

Un ejemplo de este procedimiento se aprecia en la figura 7, donde se determinaron retro-trayectorias para el episodio del factor quema de biomasa de la figura 5, alrededor del 19 de enero de 2009. Las retro-trayectorias atraviesan diversos puntos donde ocurrían incendios forestales. Estos puntos se localizaron gracias a la base de datos de acceso abierto MODIS, que contiene información global acerca de estos eventos para estos años. Antes y después de esta fecha el número y localización de incendios forestales no contribuiría a la contaminación en el sitio de muestreo. De esta forma se explica el episodio citado.

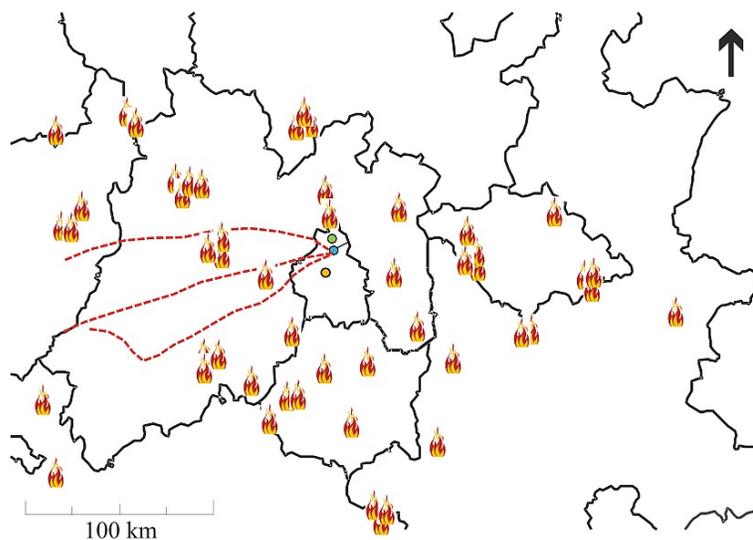


Figura 7: Retro-trayectorias determinadas con el programa HYSPLIT para el 19 de enero de 2009, así como puntos donde ocurrían incendios forestales simultáneamente con el muestreo en el Centro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El conocer las contribuciones de las fuentes es útil, desde luego, porque así es factible buscar la reducción de sus emisiones, al igual que planear a

futuro para impedir que surjan nuevas fuentes sin regulación alguna. Desde luego, esto debe llevar a una mejoría en la calidad del aire.

CONCLUSIONES

Con base en los párrafos anteriores es posible discernir, aunque sea sucintamente, los beneficios que tienen las técnicas de análisis elemental para el estudio de los aerosoles atmosféricos. Se reúne información acerca de contenidos elementales en promedio, para establecer normas o comparar con las ya implantadas. Es posible saber si alguna componente de los aerosoles es de origen natural o humano. Además, con cuánto contribuyen las fuentes a la contaminación en un punto, al igual que complementar los resultados con otras bases de información geográfica y meteorológica para situar una fuente específica. Todo esto, finalmente, redundará en una rehabilitación del medio, cuya contaminación actualmente está reflejándose en el cambio climático global.

BIBLIOGRAFÍA

Wark K. y Wraner C.F. *Contaminación del aire* (Limusa, México, 2007).

Strauss W. y Mainwaring S. J. *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*, 2^o Ed. (Trillas, México, 2011).

Aragón-Piña A. *¿Cómo son las partículas atmosféricas antropogénicas y cuál es su relación con los diversos tipos de fuentes contaminantes?* (Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 2011).

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

FUENTES DE LUZ SINCROTRÓN PARA MÉXICO: FÍSICA, CIENCIA, ECONOMÍA Y POLÍTICA

Matías Moreno*

LA física y en general la ciencia de nuestro país sufre una crisis de estancamiento. Una parte del problema puede sin duda trazarse a la falta generalizada de inversión de nuestra sociedad en las áreas de desarrollo científico y tecnológico. En efecto, al menos desde la creación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) a principios de la década de 1970, se estableció como objetivo invertir en ciencia y tecnología (CyT) el 1 % del producto interno bruto (PIB). La realidad es que, en los años transcurridos, la cifra no ha cambiado mucho y se mantiene alrededor de 0.35 %, con variaciones de 0.05 % del PIB.

La Ley de Ciencia y Tecnología (LCyT) aprobada por el Congreso de la Unión establece que el gasto del gobierno en CyT debe superar el 1 % del PIB (*Art. 9 bis de la LCyT, vigente desde 2004*). Como tantas leyes ésta no se ha cumplido y la inversión en CyT ha permanecido, con o sin ley, en sus niveles históricos.

Recientemente el ejecutivo federal retomó el reclamo de la comunidad de CyT prometiendo que al final de su período se llegará al cumplimiento de este aspecto de la LCyT. Como primer paso, el gasto federal en CyT aumentó 18 % en 2013, esto significa unos 10.5 mil millones de pesos (10.5 G\$) . Tal política, de ser mantenida, implica una responsabilidad mayor para la comunidad científica en nuestro país; se trata de como usar estos recursos frescos de manera que ellos cumplan con los objetivos de mejorar la calidad de los resultados que se desprenden de la actividad CyT de la comunidad.

Hay varios rezagos importantísimos que habrá que superar, entre otros, el rescate de cientos, si no es que miles, de jóvenes científicos y técnicos que han visto frustradas sus vocaciones por falta de oportunidades de desarrollo en el país. Pero, al materializarse los recursos prometidos, esto signi-

* Departamento de Física Teórica, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

ficará un porcentaje relativamente pequeño del incremento en el gasto de CyT. Si estimamos el gasto por investigador prorrateando los 59.5 G\$ de gasto en CyT por cada miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), unos 17,000 investigadores, obtenemos que se emplean unos 3.5 millones de pesos (3.5 M\$) al año por investigador, lo que implicaría que en este año restaría un excedente de 7 G\$ por aplicar. [Estadísticas SNI 2010]. De invertirse esta suma en infraestructura tendríamos una ventana histórica de oportunidad para transformar el panorama científico tecnológico de nuestro país. Tomemos en cuenta que los siguientes años deberíamos tener aumentos al menos tan importantes como el anunciado para 2013.

De las tablas presentadas al final de este trabajo se sigue que todos los países que tienen un desarrollo económico y tecnológico importante, excepto el nuestro, cuentan con este tipo de instalaciones.

UNA PROPUESTA

La comunidad científica en México ha tenido hasta ahora un comportamiento más bien tímido hacia los proyectos de gran envergadura. La razón de esto es clara si se valora la inversión en CyT bosquejada en la sección anterior. Sin embargo, de cumplirse las expectativas de inversión planteadas para el sexenio 2012-2018, esta conducta debe ser revisada a fondo.

En el área de ciencias exactas se han tenido dos grandes proyectos a partir de mediados del siglo XX: El Centro Nuclear instalado en Salazar, en el estado de México, y construido a finales de la década de 1960 y el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) que se inició a mediados de los de la década de 1990. Se estima que la inversión de capital en ambos proyectos es de no más de 6 G\$ a lo largo de una o dos décadas lo cual implica una inversión anual de unos 300 millones de pesos (M\$).

En este trabajo se dan algunos elementos que fundamentan la necesidad y conveniencia de contar con una fuente de luz sincrotrón para nuestro país. La mayor parte de los científicos mexicanos arquean las cejas al plantearles la necesidad de contar con una instalación de este tipo; la razón principal es que no ven condiciones para que el país invierta en este tipo de proyectos por los montos que se requieren. ¿De cuántos recursos estamos hablando? Se argumentará a continuación que una inversión de 500 millones de dólares (unos 6.5 G\$) a lo largo de un período de seis a ocho años satisfaría las necesidades de la primera fuente de luz sincrotrón mexicana. Hay alternativas más y menos onerosas pero éstas tienen enormes posibilidades de dar resultados insatisfactorios ya sea por conducir a una fuente de luz

poco interesante para el desarrollo de CyT o porque el proyecto resultante le quedaría grande a las necesidades del país en el lustro que seguiría a la puesta en marcha de esa instalación.

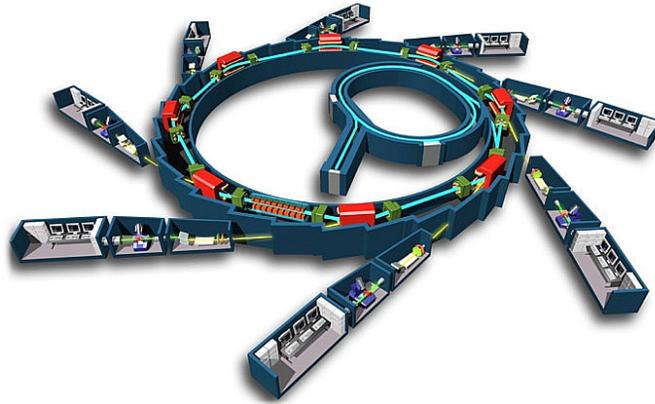


Figura 1: Elementos esenciales de una fuente de luz sincrotrón.

En la Fig. 1 se muestran los elementos esenciales de una fuente de luz sincrotrón. Para producir una luz de calidad y con una capacidad para realizar estudios e investigación de frontera se requiere de:

- i. Un acelerador lineal que lleve a los electrones a una energía de 100 a 200 MeV.
- ii. Un impulsor típicamente circular que eleva la energía del haz de electrones a varios GeV.
- iii. Un anillo de acumulación en donde se mantienen los electrones circulando. La radiación de sincrotrón útil se produce en este anillo y se conduce a
- iv. Las terminales, que no son otra cosa que laboratorios donde se acondiciona la luz entregada por el anillo de acumulación y con ella se realizan estudios e investigaciones.

PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA LUZ DE SINCROTRÓN

En primer lugar veamos los principios físicos que permiten este tipo de fuente de luz. La física clásica predice que una partícula cargada eléctricamente radía al ser acelerada [Classical Electrodynamics, Jackson, Liénard-Wiechert potentials]. Aunque se sabe que esta predicción tiene correcciones

cuánticas, el efecto de ellas sobre un haz de partículas puede ser ignorado en un primer acercamiento. La radiación electromagnética, que incluye la luz visible, la infrarroja y los rayos X y que es emitida cuando un haz cargado gira en una órbita circular o casi circular, es llamada luz de sincrotrón.

Dada una fuerza, la aceleración de una partícula más ligera será mayor y en consecuencia radiará más fácilmente que una más pesada. Ésta es una de las razones por la que para producir luz de sincrotrón de manera controlada se utilizan aceleradores de electrones ya que siendo las partículas cargadas más ligeras se logra acelerarlas más fácilmente. La relación electrodinámica que controla la potencia total emitida es la fórmula de Larmor de acuerdo a la cual la potencia radiada es proporcional al cuadrado de la aceleración de la partícula (ver el apéndice para apreciar las ecuaciones de manera explícita). Si el electrón se mueve a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, la luz emitida se concentra en un cono cuyo ángulo de apertura es cada vez más cerrado al aumentar la energía del haz de electrones. Así, si la energía del haz es un GeV, el ángulo de la salida de la luz será de 0.0005 radianes, alrededor de 1.5 miligrados.

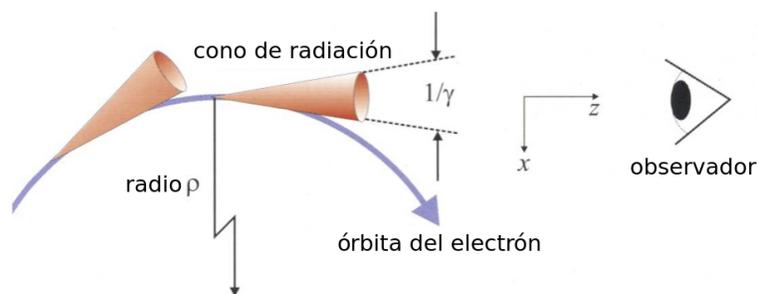


Figura 2: Esquema de la radiación de sincrotrón producida por una partícula cargada relativista.

Esta luz fue observada por primera vez en 1947 en un tipo de acelerador llamado sincrotrón. En él la energía se le agrega a los electrones de manera sincronizada a su paso por un segmento de la órbita circular, de ahí adquirió esta luz su singular nombre.

El acuerdo entre teoría y experimento indica un alto grado de conocimiento del fenómeno de producción de la luz sincrotrón y es la base que permite el desarrollo tecnológico en el que se fundamenta el enorme éxito que las fuentes de luz sincrotrón.

Un área de la física y la ingeniería que ha avanzado notablemente desde la segunda mitad del siglo XX es la física de aceleradores. La luz de sincro-

trón fue percibida inicialmente como un problema ya que hace perder la energía que se le ha impreso a los electrones. Para mediados de los años sesenta este problema era severo y los aceleradores tuvieron que hacerse cada vez más grandes para disminuir la radiación de sincrotrón. Al mismo tiempo la radiación era tan intensa que otros científicos la empezaron a usar para analizar todo tipo de materiales. Lo que inició siendo una dificultad se ha convertido en la razón científica, tecnológica e industrial para la construcción y explotación de los aceleradores de electrones.

PROPIEDADES DE LA LUZ SINCROTRÓN

Las principales características de la luz sincrotrón hoy producida en alrededor de sesenta laboratorios en el mundo son extraordinarias. Se trata de una luz

1. extremadamente brillante,
2. con un amplio espectro que va desde el infrarrojo hasta los rayos X,
3. esto ocurre en un haz de luz sumamente fino, semejante a un láser, por lo que se puede analizar con ella una parte pequeña de una muestra
4. la luz se produce en pulsos que pueden ser utilizados en estudios de comportamiento temporal y, finalmente,
5. esta luz está polarizada lo que permite hacer con ella estudios de contraste.

La importancia de los laboratorios de luz sincrotrón en el desarrollo científico y tecnológico es comparable a la que tuvo el desarrollo de los microscopios en el siglo XIX y principios del XX. Son instrumentos de trabajo que impulsan el desarrollo de innumerables áreas del conocimiento y que se han vuelto indispensables.

Entre los quince países con mayor PIB, México es el catorceavo y de ellos es el único que no cuenta con un laboratorio de este tipo. Para darnos una idea de las oportunidades de desarrollo que como país estamos perdiendo baste señalar que en Alemania, Estados Unidos y Japón hay una fuente de luz sincrotrón por cada 20 millones de habitantes ¡Con 100 millones de habitantes nuestro país debería tener cinco instalaciones de este tipo!

Estas instalaciones son capaces de correr decenas de experimentos en paralelo. Hoy en día se usan en estudios que van desde la industria pe-

trótera a la creación de nuevos materiales. Un uso importante que ocupa un alto porcentaje de las fuentes de luz sincrotrón hoy en día es el estudio estructural y analítico de macromoléculas biológicas. El avance de áreas enteras de la biología, la biomedicina y la industria farmacéutica es cada vez más dependiente de los estudios que son posibles gracias a este tipo de instalaciones. En estudios arqueológicos en años recientes, la calidad de las tomografías realizadas con la luz de sincrotrón ha hecho posible determinar con gran nitidez no sólo las características óseas de restos humanoides sino, sorprendentemente, el tipo de organismos que se alimentaron de ellos después de muertos.

La variedad de estudios que se logran en las fuentes de luz sincrotrón crece año con año. Hay sincrotrones dedicados a usos puramente industriales y otros con una vocación orientada a la creación, estudio e innovación de materiales modernos.

¿QUIÉN TIENE ACCESO?

Las puertas de la mayoría de los sincrotrones en el mundo tienen un lugar abierto para la investigación científica y tecnológica internacional. Decenas de científicos mexicanos han tomado la oportunidad de iniciarse en los estudios realizados en estos laboratorios recibiendo y dando conocimientos sin otra cortapisa que el tener una propuesta de investigación o desarrollo interesante. Sin embargo, tal estado de cosas implica en la práctica que los estudios ahí realizados deben ser publicados, de otra forma los laboratorios cargan un costo por uso del laboratorio. Todo lo cual implica, al no tener un laboratorio propio, que se pierda la libertad de investigación y, para el caso de desarrollos tecnológicos e industriales, los resultados no quedan resguardados. En resumen se pierde soberanía.

Varios países que hasta hace unos veinte años tenían un desarrollo científico y tecnológico semejante al nuestro se propusieron tener fuentes de luz sincrotrónica nacionales. La razón es semejante en todos los casos: estos laboratorios impulsan la investigación interdisciplinaria de alta calidad y son semilleros de ideas e innovación, impulsando un desarrollo soberano. Brasil, España, Corea, China, Australia e India son ejemplos notables; pero aún más son los casos de Jordania o Singapur. Como antes se mencionó, entre las quince mayores economías del planeta sólo nuestro país carece de este tipo de laboratorios.

Los usos científicos por si solos garantizarían el uso de una o varias instalaciones de este tipo, pero la razón que los hace indispensables es la

capacidad de hacer estudios estratégicos e innovadores en la industria, notablemente la de fármacos y la petrolera.

TIPOS DE SINCROTRÓN

A partir del uso de la radiación de sincrotrón se han generado varios cambios importantes en su diseño. Hoy hay cuatro generaciones de fuentes de luz sincrotrón:

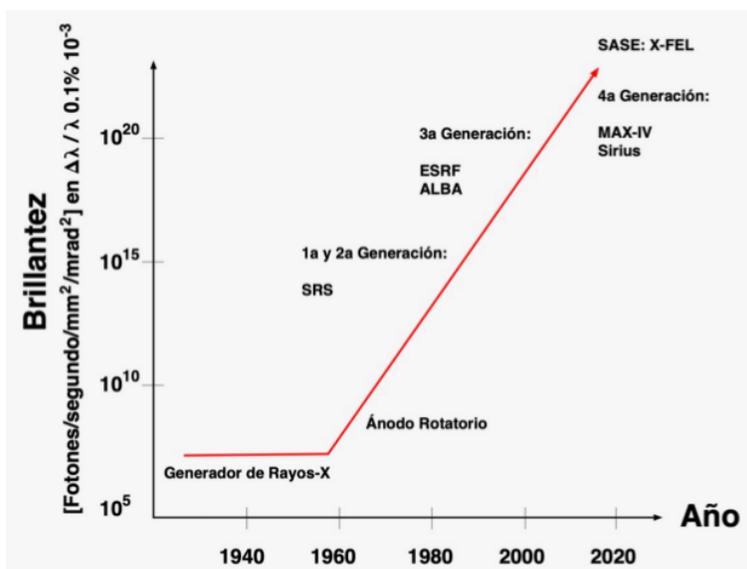


Figura 3: Gráfica que muestra la brillantez característica de varios tipos de fuentes de luz.

1. La primera generación fue una en que la luz era un subproducto indeseado de los aceleradores de electrones. Lograr electrones de alta energía era el objetivo primario de los aceleradores y ellos estaban diseñados y optimizados para el estudio de las colisiones de los electrones con núcleos atómicos. La energía que se perdía en la luz de sincrotrón era vista como un mal necesario. Los experimentos que con ella se hacían fueron entonces llamados experimentos parásitos. Sin embargo, los usos de estos últimos llevaron a un creciente número de usuarios que pronto requirieron de haces de electrones que produjeran luz de mayor brillantez; esto condujo a finales de la década de 1960 al diseño

de la segunda generación de fuentes de luz sincrotrón.

2. El diseño de los aceleradores en la segunda generación de fuentes de luz sincrotrón se optimiza para la obtención de la radiación. El parámetro del haz que mejor describe la calidad correspondiente se llama la emitancia. En general la intensidad por unidad de área, la llamada brillantez, de la luz producida será mayor si la emitancia del haz que lo produce es más pequeña.

a. La emitancia de un haz de electrones es producida por las oscilaciones de los electrones en el haz respecto a la trayectoria de diseño. Hay oscilaciones en las tres direcciones espaciales. Las oscilaciones se llaman longitudinales o sincrotrónicas cuando ocurren a lo largo de la dirección de movimiento del haz. Las otras dos oscilaciones son transversales al haz y son llamadas oscilaciones betatrón. Las tres oscilaciones son en buena aproximación independientes entre sí.

b. Un electrón gira muchas veces alrededor de la trayectoria de diseño. Si no se le repone la energía perdida por radiación y por choques, el haz se frenará. Típicamente un haz pierde una pequeña fracción de su energía en cada giro. Esto implica que suponer la velocidad del haz constante en una sola órbita es una buena aproximación, por lo que se acostumbra usar la distancia recorrida como parámetro en vez del tiempo.

c. La emitancia en cada dirección de oscilación es un invariante adiabático. Es en efecto el área en espacio fase de la oscilación. Las emitancias tendrían entonces unidades de velocidad por longitud, pero como en un sincrotrón el tiempo es sustituido por la distancia de recorrido del haz, entonces las emitancias tienen unidades de longitud. Sin embargo, como una velocidad transversal implica un ángulo de desviación respecto a la trayectoria ideal, es convencional medir la emitancia en unidades de longitud-ángulo.

d. Para motivos de la luz de sincrotrón, el producto de

las emitancias transversales da una medida de qué tan grande es el área que produce la luz de sincrotrón. De tal manera que si se quiere una luz de alta brillantez se buscará minimizar esta área.

Para motivos de la luz de sincrotrón el producto de las emitancias transversales da una medida de que tan grande es el área que produce la luz de sincrotrón. De tal manera que si se quiere una luz de alta brillantez se buscará minimizar esta área.

3. La brillantez máxima en una fuente de luz de segunda generación es millones de veces mayor a la que se obtiene con una fuente tradicional, esto es particularmente cierto en la parte del espectro que corresponde a los rayos X. Tener rayos X de alta brillantez y concentrados en una pequeña área permite analizar muestras de manera localizada y el aumento de la brillantez significa un ahorro de tiempo en el que se puede hacer la medición correspondiente.

Una limitación importante de los sincrotrones de segunda generación es que la brillantez está limitada por el campo magnético de los imanes que conduciendo el haz en un circuito aceleran los electrones generan la potencia radiada en la luz.

4. Para incrementar aún más la brillantez se utilizan los dispositivos de inserción. Estos dispositivos son secciones del circuito donde se somete el haz de electrones a un campo magnético alternante, logrando con ello una trayectoria del haz sinusoidal, esta trayectoria recuerda la figura de una serpiente y como tales dispositivos fueron desarrollados en la parte siberiana de la Unión Soviética se les conoció durante algún tiempo como serpientes siberianas.

La idea central de estos dispositivos es que al hacer oscilar los electrones en la trayectoria serpentina se logra una gran aceleración en las crestas de la trayectoria, además como el haz es relativista, la luz sale hacia delante. Por lo que la brillantez final es el resultado de tener una mayor aceleración y tener varias crestas de la trayectoria emitiendo en la misma dirección. Hay dos tipos de serpientes siberianas, los wigglers y los onduladores. Los wigglers producen un espectro electromagnético más

amplio que los onduladores. A los aceleradores que contienen dispositivos de inserción se les conoce como de tercera generación.

5. Finalmente la cuarta generación de fuentes de luz sincrotrón se aparta del concepto cíclico de las anteriores generaciones. Toma de la tercera la idea de llevar el haz de electrones a una trayectoria sinusoidal pero a ésta se le agrega la condición de que la luz emitida por una cresta llegue a otra cresta en sincronía con el paso de un paquete de electrones. Si la luz es suficientemente brillante se produce una emisión de luz inducida en estos electrones y se produce un efecto láser. En ésta, a diferencia del láser tradicional, los electrones no están en un nivel atómico y se les llama Láseres de Electrones Libres, (FEL, por sus siglas en inglés). Una de las características que hacen muy interesante a los FEL es que se logran intensidades aún mayores que la tercera generación y adicionalmente el efecto láser da un enorme grado de coherencia a la luz producida. Una limitación importante de los diseños actuales de estos laboratorios es el número limitado de experimentos que se pueden hacer simultáneamente. En consecuencia la tercera generación de sincrotrones sigue teniendo un número de usuarios crecientes y los FEL se dejan para una actualización de los laboratorios de tercera generación.

USUARIOS MEXICANOS

Nuestro país cuenta con una comunidad creciente de usuarios de luz sincrotrón. Así lo exige la calidad en la investigación y el desarrollo industrial modernos. Ciertamente se requiere de la formación de recursos humanos que puedan diseñar, construir, operar y explotar una fuente de luz sincrotrón. Varias veces se ha propuesto la conveniencia de tener un sincrotrón en México. Recientemente el Conacyt ha formado un grupo de trabajo para definir las características de un sincrotrón mexicano y realizar un censo de los usuarios nacionales. Este censo realizado sólo en el sector académico muestra más de 120 usuarios en el país. De ellos la mitad acudieron a la Primera Reunión de Usuarios de Luz Sincrotrón realizada en Cuernavaca, Morelos.

Es claro que para hacer buen uso de una instalación de luz de sincrotrón se necesitará aumentar el número de usuarios. En particular es recomendable en el corto plazo instalar terminales en varios laboratorios ya existentes

para incrementar el número de usuarios y aprender a gestionar estos laboratorios.

ACCIONES PARA IMPULSAR EL SINCROTRÓN MEXICANO

Entre las posibles acciones a corto plazo que se aprecian como pasos firmes para el desarrollo de este proyecto destacan dos:

- 1) la formación de un grupo de científicos e ingenieros en aceleradores modernos y
- 2) la instalación de una o más terminales mexicanas en laboratorios extranjeros.

Lo que daría a nuestro país la experiencia en la operación y manejo de estas instalaciones y permitiría a la vez tener un mayor grado de autonomía en el tipo de investigación y desarrollo tecnológico que determinemos realizar.

Nuestro país tiene en este momento varias puertas abiertas para dar pasos relevantes; dos de ellas merecen especial atención: el acelerador español, llamado ALBA, ha ofrecido apoyos para que un grupo de mexicanos se entrene ahí y consideraría la posibilidad de instalar una de sus terminales de común acuerdo con México. La segunda oferta es del sincrotrón australiano, ésta también se centra en la puesta de una línea mexicana o latinoamericana. Ambos aceleradores son de reciente construcción y representan el estado del arte en varios aspectos de las fuentes de luz.

CONCLUSIONES Y RETOS

Estamos ante una gran oportunidad de desarrollo, el monto de la inversión que el país debe de hacer en un laboratorio de aceleradores para luz sincrotrón no es para nada despreciable y requerirá nuevas formas de organización para los proyectos científico-tecnológicos.

Pero el problema fundamental es que de no hacerse pronto el país perdería en competitividad científica, tecnológica e industrial. Los tiempos de diseño y construcción han sido estimados en base a experiencias como la española en dos a tres años para el diseño y de cinco a ocho años para la puesta en operación, el llamado comisionamiento del sincrotrón.

El diseño del sincrotrón requiere prestar atención a múltiples factores. Uno que es básico, es tener una instalación que esté a la altura de los retos y que no sea obsoleta de inicio. Eso deja de lado cualquier pretensión de

construir un sincrotrón de segunda generación. Si aceptamos que el país requiere transformarse en el mediano plazo en una sociedad competitiva, se deben tener los instrumentos científicos y tecnológicos para hacerlo. Ésta es una manera probada para pasar de una sociedad basada en la explotación de su mano de obra barata en una sociedad del conocimiento que produzca bienes con un gran valor agregado.

Una palabra final de precaución. Ningún instrumento por sí solo logrará la transformación de nuestro país en uno que dé mayores y mejores oportunidades a sus ciudadanos. Pero un compromiso como el anunciado por la actual administración para impulsar la transformación de nuestra sociedad en una sociedad del conocimiento, debe convocar a los científicos e ingenieros del país a buscar los métodos para que este enorme esfuerzo del país fructifique. La propuesta de diseñar, construir y explotar una fuente de luz sincrotrón busca contribuir a este objetivo.

ACOTACIONES

Este trabajo fue escrito hace unos tres años, el contenido hasta este punto sólo ha sufrido cambios de estilo. Sin embargo es oportuno señalar los avances que ha tenido la iniciativa de construir la primera Fuente de Luz de Sincrotrón Mexicana (FLSM).

En primer lugar la iniciativa de impulsar esta iniciativa fue promovida entre 2013 y 2016 por el Estado de Morelos y Conacyt financiando los estudios de factibilidad con un proyecto FOMIX que fue entregado a estas instancias en marzo de 2016. El compromiso del gobierno estatal de proveer un terreno adecuado y gestionar los fondos para construirlo nunca se logró.

En noviembre de 2018 el Estado de Hidalgo lanzó la iniciativa de construir una FLSM y fue más allá. Prometió un presupuesto semilla de 500 M\$ para iniciar el proyecto y ofreció también un terreno si la decisión para construirlo era en Hidalgo. Se creó por decreto estatal en marzo de 2019 el Consejo Ejecutivo del Complejo Científico y Tecnológico Sincrotrón en el Estado de Hidalgo y se formaron los Consejos Técnicos Internacional y Nacional. Esperamos que a estos buenos augurios le sigan las acciones correspondientes.

Un factor adicional a tener en cuenta es que a partir de 2017 se tuvo un recorte en los gastos federales de CyT mayúsculo que ha sido continuado en 2019. De tal forma que si en 2016 se tuvo un presupuesto dedicado a CyT entre 0.5 % y 0.6 % del Producto Interno Bruto se ha regresado en 2019 al tristemente célebre intervalo de inversión en este campo de 0.4 % a 0.5 %.

AGRADECIMIENTOS

Es un placer reconocer la visión y el esfuerzo de nuestra colega Esbaide Adem al proponer y editar este libro. Recientemente Octavio Miramontes a propuesto la publicación de este libro por métodos electrónicos, muchas gracias por su iniciativa. Quiero finalmente agradecer la ayuda del Ing. Fis. Rodolfo Leo en la elaboración de las tablas y figuras que aparecen en este trabajo.

País	Lugar en la Lista de Economías 2009 (PIB en Millones de Dólares - Población)	Número de Laboratorios de Luz Sincrotrón	Generación	Cantidad
Estados Unidos	1 (14,119,000 - 315,579,000)	14	2	2
			3	6
			4 (FEL)	6
Japón	2 (5,068,996 - 127,400,000)	12	2	4
			3	5
			4 (FEL)	2
			CLS	1
Alemania	4 (3,330,032 - 81,946,000)	7	2	2
			3	4
			4 (FEL)	1
Rusia	12 (1,231,893 - 143,369,806)	6	2	5
			3	1
Reino Unido	6 (2,174,530 - 63,181,775)	5	2	1
			3	1
China	3 (4,985,461 - 1,354,040,000)	4	2	2
			3	2
Francia	5 (2,649,390 - 65,635,000)	4	2	1
			3	1
			4 (FEL)	1
Italia	7 (2,112,780 - 60,870,745)	2	3	1
			4 (FEL)	1
Brasil	8 (1,594,490 - 193,946,886)	2	2	1
			3	1
India	10 (1,377,265 - 1,210,193,422)	2	2	1
			3	1
España	9 (1,460,250 - 46,815,916)	1	3	1
México	14 (874,902 - 116,901,761)	0		

Tabla 1: Sincrotrones en las diez mayores economías mundiales (2009).

País	Instalación	Año
España	ALBA	2010
Alemania	PETRA III	2009
Suecia	MAX III	2008
Taiwan	NSRRC	2008
China	BEPC II	2008
China	SSRF	2007
Australia	Australian Synchrotron	2006
Francia	SOLEIL	2006
Reino Unido	DIAMOND	2006
India	Indus II	2005
Canada	Canadian Lightsource	2004
Tailandia	SLRI	2004
Suiza	Swiss Light Source	2001
Alemania	ANKA	2000

Tabla 2: Sincrotrones Comisionados del año 2000 a la fecha.

País	Instalación	Energía (GeV)
Brasil	SIRIUS	3
Jordania	SESAME	2.5
Dinamarca	ASTRID II	0.58
Armenia	CANDLE	3

Tabla 3: Sincrotrones en construcción, planeación o diseño.

APÉNDICE

La física clásica predice que una partícula cargada eléctricamente radía al ser acelerada [*Classical Electrodynamics, Jackson, Liènard-Wiechert potentials*]. Aunque se sabe que esta predicción tiene correcciones cuánticas, el efecto de ellas sobre un haz de partículas puede ser ignorado en un primer acercamiento. La relación electrodinámica que controla la potencia total emitida, P , es la fórmula de Larmor

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} a^2, \quad (3)$$

dónde, a , es la aceleración de la partícula, e , su carga eléctrica y c , la velocidad de la luz. Si el electrón se mueve a velocidades cercanas a la velocidad de la luz la luz emitida se concentra en un cono cuyo ángulo de apertura es cada vez más cerrado. Si llamamos E a la energía del electrón el ángulo de salida de la luz es proporcional a mc^2/E .

Para el caso relativista la aceleración es la centrípeta y por tanto la fórmula de Larmor covariante se transforma en

$$P = -\frac{2}{3} \frac{e^2}{m^2 c^3} \left(\frac{dp_\mu}{d\tau} \frac{dp^\mu}{d\tau} \right) = \frac{2}{3} \frac{e^2}{m^4 c^3} \frac{p^4}{\rho^2} \approx \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^7 m^4} \frac{E^4}{\rho^2}, \quad (4)$$

con p el ímpetu de la partícula y ρ el radio de la órbita circular, la última expresión desprecia la masa en reposo del electrón y es válida en el límite ultrarelativista. Para una partícula en un campo magnético externo uno tiene adicionalmente la relación $pc = e\rho B$, que liga el ímpetu de la partícula a la intensidad del campo magnético.

LAS RADIACIONES EN EL SIGLO XXI

Jorge Rickards*

UN día como cualquier otro, enciendo la luz. No tengo modo de saber qué tanto, pero una parte de la electricidad viene de una planta nuclear. Miro el reloj digital. El proceso de fabricación del microcircuito de silicio incluye implantación de iones. Abro la ventana. Sale la minúscula cantidad de gas radón radiactivo que se acumuló durante la noche. Me rasuro. La hoja de afeitar fue implantada con iones para reducir el desgaste. Me pongo una venda en la cortada. La venda fue esterilizada con radiación. Enciendo la televisión. Los circuitos integrados fueron manufacturados usando iones implantados. Tomo un huevo revuelto con papas. Es posible que el huevo haya sido irradiado para eliminar la salmonela. La papa fue irradiada para preservarla sin brotes. Tomo un refresco. El nivel dentro del bote fue inspeccionado en línea con una fuente radiactiva. Envuelvo mi sándwich. El plástico de la envoltura fue tratado con radiación. Leo el periódico. Tal vez la tinta fue curada con radiación. Hablo por el celular. El *chip* es otro de los mencionados microcircuitos. Salgo. La atmósfera sobre mi cabeza me protege de parte de la radiación cósmica. Se observa gran contaminación. Una parte fue estudiada con fluorescencia de rayos X. Enciendo el auto. La computadora tiene microcircuitos. La gasolina viene del petróleo, cuya exploración se hizo con fuentes de neutrones. Las obstrucciones en los ductos de petróleo se localizan con fuentes radiactivas. El nivel en los tanques de almacenamiento se mide también con fuentes radiactivas. En la vulcanización de las llantas del auto se usó radiación. El motor fue inspeccionado con radiografía. Salgo a la carretera. Para controlar el contenido de humedad del asfalto se usó una fuente de neutrones.

Paso frente al hospital. Allí rutinariamente se practican el radiodiagnóstico, la radioterapia y la medicina nuclear. Los instrumentos quirúrgicos fueron esterilizados con radiación. Los implantes ortopédicos fueron mejo-

* Departamento de Física Experimental, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

rados con iones implantados. El edificio fue diseñado para proteger al personal de la radiación, de la cual constantemente se miden los niveles. Llego a mi oficina y enciendo la computadora. Más microcircuitos. No fumo, pero hay un detector de humo que utiliza una fuente radiactiva. . . .

El empleo de las radiaciones ionizantes (alfa, beta, gamma, neutrones, rayos X, etc.) de una manera u otra se ha infiltrado en buena parte de nuestra vida cotidiana, aunque esto no siempre es evidente. Como no se ven ni se sienten, cuando se habla de radiaciones, con frecuencia se les percibe como algo misterioso y peligroso. Misteriosas no son; peligrosas pueden ser si no se les maneja adecuadamente, como cuando uno cruza la calle sin fijarse. De hecho, se conocen con gran detalle las características y propiedades de las radiaciones, así como la factibilidad de su aplicación. La proliferación de su uso ha ido de la mano con la existencia de industrias multimillonarias dedicadas a las radiaciones en varios de sus aspectos, de producción de equipos y fuentes de radiación, de seguridad radiológica, de servicios de irradiación, de investigación, de usos médicos y otros. Las aplicaciones de las radiaciones están en continuo desarrollo y mejoramiento.

Muy pronto después de su descubrimiento a fines del Siglo XIX los rayos X encontraron aplicaciones médicas aunque no se tenía el pleno conocimiento ni de su naturaleza ni de las posibles implicaciones para la salud (recordar nombres como Becquerel y Curie). Luego, durante la primera mitad del Siglo XX vino una etapa en que se estudiaron en detalle muchos aspectos básicos de las diferentes radiaciones (por ejemplo, alfa, beta y gamma): su origen, su relación con los átomos y los núcleos atómicos, su naturaleza cuántica y relativista, su energía, su interacción con la materia (Einstein, Rutherford, Bohr, Bethe y otros). También se desarrollaron las técnicas para producir las distintas radiaciones (aceleradores tipo Van de Graaff, Cockroft-Walton, ciclotrones y otros) y cómo medirlas. En este lapso se descubrieron nuevas radiaciones como los neutrones, los positrones y los neutrinos.

Cerca de mediados de siglo pasado ya había un considerable entendimiento de la física nuclear y las radiaciones. Esto dio lugar a que nos diéramos cuenta de que se podría aprovechar la enorme energía almacenada en los núcleos. Aparte de que se pudo liberar la energía en forma de explosiones nucleares, se desarrollaron los primeros reactores de fisión nuclear controlada, y con ello la producción de radioisótopos. Comenzó y creció rápidamente la disponibilidad de éstos. También se extendió el acceso a otras fuentes de radiaciones: los aceleradores de partículas. En esta etapa se iniciaron algunas de las empresas de instrumentos para producir y medir

radiaciones. También aumentaron los usos médicos, y se evidenció la necesidad de conocer más a fondo los efectos de las radiaciones, especialmente en los organismos vivos.

La segunda mitad del Siglo XX vio un crecimiento espectacular de las aplicaciones de la tecnología nuclear y de las radiaciones. Se construyeron cientos de plantas nucleares para producir energía eléctrica, bajo estrictas normas de eficiencia y seguridad. Proliferaron los usos industriales de la radiación como la radiografía industrial, los medidores de humedad, de densidad, de composición química, los trazadores en líquidos, en tuberías y en organismos biológicos, los monitores de niveles, los detectores de humo. Se perfeccionaron aparatos analíticos, incluyendo medidores de contaminación y muestras geológicas, arqueológicas y biológicas. Se desarrollaron sistemas de irradiación de alimentos, aumentando así su duración sin refrigeración e impidiendo brotes. Se pusieron en operación plantas de control de plagas sin sustancias tóxicas, como se hizo en el caso del gusano barrenador. Se esterilizan ahora de manera rutinaria productos médicos, como vendas, jeringas e instrumentos quirúrgicos. Se implementó el tratamiento de aguas negras. Se perfeccionó e implementó la irradiación para polimerizar plásticos.



Acelerador Pelletron de 3 millones de volts del Instituto de Física de la UNAM. Dada su gran versatilidad para implantar diversos iones con energías y flujos controlables, promete continuar siendo aparato esencial para investigar la interacción de las radiaciones con la materia y generar nuevos materiales.

En este lapso se perfeccionaron los usos médicos de las radiaciones. Con la ayuda de la computación y barridos de distintas geometrías, se afinaron los métodos de radiodiagnóstico, para obtener máxima precisión y sensibilidad. En radioterapia se avanzó en optimizar los tratamientos sin afectar tejidos vecinos. En medicina nuclear se desarrolló el uso de radioisótopos de vida media corta. Al mismo tiempo se fue colectando información sobre los efectos de la radiación en los humanos, para tratar de establecer los límites de dosis que pueden tolerar con seguridad los distintos sectores de la población, en diferentes escenarios de irradiación. Se progresó en el conocimiento de la dosis debida al fondo natural, cuyo principal contribuyente resultó ser el radón.

De todos los desarrollos tal vez el que más impacto ha tenido es la implantación de iones en dispositivos electrónicos. Un implantador de iones es un acelerador. La tecnología de aceleradores, inicialmente desarrollada para la física nuclear, se diversificó al perfeccionar sistemas de alto vacío, altos voltajes, fuentes de iones, y óptica de iones, para implantar casi cualquier elemento en el silicio semiconductor. Un microcircuito típico puede requerir más de 30 implantaciones distintas, de diferentes elementos, con distintas energías y diferentes dosis de implantación. El proceso ha sido la base de una verdadera revolución en muchas industrias, como la electrónica, la de comunicación, la de computación, la manufacturera. También es de gran impacto en la de control automatizado, la del transporte, y hasta la de la diversión. Los desarrollos se han dado con una rapidez extraordinaria. Resulta que los mismos aceleradores se usan para caracterizar las capas delgadas que requiere la miniaturización, así que hay una doble utilidad.

En particular, una de las técnicas que contribuyó a este desarrollo fue el alto vacío, el cual se ha ido mejorando hasta lograrse superficies esencialmente libres de contaminantes, lo que permite obtener imágenes a nivel de átomos individuales. También el perfeccionamiento de la microscopía electrónica de barrido y de transmisión ha sido piedra angular en este proceso. De hecho, un microscopio electrónico es un acelerador de electrones. Asociadas a éstas, se desarrollaron varias otras técnicas muy sensibles para el estudio de superficies y capas delgadas que han sido de gran utilidad, como la retro-dispersión de iones, la espectroscopía de electrones Auger. También se han aplicado las reacciones nucleares, la espectroscopía de masas de iones secundarios, la fluorescencia de rayos X excitada por iones y electrones, la difracción de rayos X y de neutrones, la erosión iónica, y muchas otras. Es interesante notar que la industria del alto vacío (típicamente 10^{-6} mm Hg ó $1,33 \times 10^{-4}$ Pa) y el ultra-alto vacío ($<10^{-8}$ mm Hg ó $1,33 \times 10^{-6}$ Pa) ha sido

impulsada principalmente por físicos; pues las industrias convencionales en general no requieren de tan bajas presiones.

La investigación básica y aplicada floreció como nunca antes, al disponerse de una serie de técnicas más perfeccionadas. Por un lado, el alto vacío. Otro ejemplo evidente fue la computación, que creció en rapidez y capacidad. Esto dio lugar a una nueva técnica, la simulación de procesos, antes inalcanzable. Los cálculos de tipo Monte Carlo con números aleatorios y los cálculos de dinámica molecular aprovechan al máximo esta capacidad de cómputo.

En el área experimental, otro de los grandes avances fue la construcción de sincrotrones, grandes aceleradores de alta potencia que producen fotones en grandes cantidades. Esto permite estudiar fenómenos sutiles que antes no se podían estudiar. Un desarrollo semejante es el de aceleradores de alta potencia para reventar núcleos y así producir neutrones en grandes cantidades. Estos aparatos se usan para estudiar procesos de otras disciplinas, como la biología, así que sirven de enlace con el resto de la ciencia.

Hoy en día la industria de las radiaciones (fuentes de radiación, detectores, aceleradores, electrónica de pulsos, equipos médicos, reactores nucleares, dosímetros) y técnicas asociadas (computación, alto vacío, equipos analíticos, técnicas de estudio de superficies y capas delgadas, multitud de aplicaciones específicas) es una industria madura y sólida, integrada por un gran número de empresas de variadas actividades: manufactura, servicios, asesoría, enseñanza. Vale la pena mencionar que casi todos estos avances han sido desarrollados por físicos, tanto teóricos como prácticos, tanto en el medio académico como el empresarial y el gubernamental, tanto en el ámbito nacional como el internacional. De manera natural, la industria de las radiaciones ha sido, y es, una fuente importante de empleos para físicos de los niveles técnico, profesional, y de posgrado.

Ante este escenario ¿Qué podemos esperar de la ciencia de las radiaciones en este siglo?

Sin duda, la industria de las radiaciones irá creciendo y diversificándose, pues sus aplicaciones están distribuidas ampliamente y la industria se encuentra bien afianzada. Las necesidades, en particular de las aplicaciones médicas y de la industria nuclear, lo garantizan. Hay una continua búsqueda por mayor eficiencia y mayor precisión en los aparatos. También los proyectos de investigación y desarrollo, grandes y pequeños, requerirán del mayor desarrollo de las industrias.

A la par se irá desarrollando la industria del alto vacío, pues es indispensable para proyectos de alta tecnología. Aquí, por el estilo modular de mu-

chos de los equipos de alto vacío, uno puede adquirir instrumentos diseñados ad hoc para ciertas aplicaciones, o ir armando gradualmente el aparato. Esto es útil en particular para los proyectos de investigación y desarrollo.

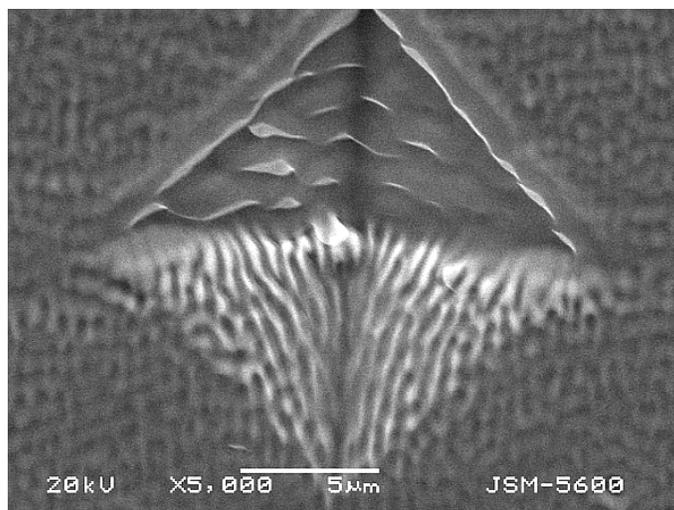
La ciencia de las radiaciones ha pasado de la etapa de investigación básica a la de aplicaciones. Los fenómenos físicos básicos se explican con modelos bien conocidos. Aunque nunca puede uno descartar sorpresas, no se esperaría ninguna novedad en el área de ciencia básica. En todo caso, se podrían afinar y perfeccionar los modelos con la ayuda de la computación moderna.

En cambio, en el área de las aplicaciones aún hay mucho por estudiar. Las aplicaciones se basan en la interacción de las radiaciones con la materia. Hay algunos fenómenos, como la ionización, el daño estructural, las reacciones químicas, la erosión o el calentamiento, que son los procesos iniciales comunes, dependientes del tipo de radiación incidente. Para algunos de estos procesos iniciales se cuenta para explicarlos, con modelos semiempíricos. Sin embargo, pasada la fase inicial de absorción de la radiación, cada material responde de manera diferente dependiendo de su estado físico y su composición química, de su estructura microscópica y macroscópica, de la temperatura, de la geometría (por ejemplo capas delgadas), y del entorno. También es importante si el material es biológico, pues la complicación es mayor. Algunos de estos procesos secundarios se conocen bien pero los mecanismos se entienden poco. Seguramente, a medida que se tenga más información experimental, se irán comprendiendo mejor. Es claro que hay una enorme variedad de procesos—varios por cada material—y entre mejor se conozcan, mayor es la posibilidad de aplicaciones. En última instancia, sería deseable conocer con mayor detalle los efectos que las radiaciones producen en el tejido humano; ésta es un área en donde se traslapan la física y la ciencia médica.

Las propiedades de los todos los materiales se modifican al ser irradiados. Por ejemplo en los polímeros se usa la radiación para promover su polimerización. Pero también se estudian los efectos de la radiación en los plásticos ya polimerizados. Puede haber degradación por el rompimiento de enlaces químicos, pero también puede haber entrecruzamiento y cristalización, y estos tres efectos cambian sus propiedades. Seguramente habrá desarrollo de nuevos polímeros, y la irradiación para mejorar sus propiedades, todo ello estimulado por el mercado.

Probablemente el adelanto más espectacular que involucra la modificación de materiales con radiación, se ha dado en la industria electrónica: los microcircuitos, basados en buena parte en la implantación de iones para im-

purificar el silicio. No se vislumbra una disminución de esta industria, sino un crecimiento sostenido, siguiendo la llamada Ley de Moore, que indica que el número de transistores que se puede poner a bajo costo en un circuito integrado se duplica cada 18 meses. Más o menos así crecen las opciones de nuevos aparatos, y por lo tanto de su demanda, con enormes implicaciones económicas. La industria electrónica basada en dispositivos de silicio parece que llegó para quedarse por un buen rato. Ningún otro semiconductor que se conozca hasta ahora reúne sus características: bajo costo, disponibilidad, factibilidad de producción, y manejo seguro. Otros semiconductores, como el germanio o el arseniuro de galio, difícilmente podrán competir con el silicio, excepto para aplicaciones especiales. Éstas hasta ahora son pocas, pero seguramente irán en aumento. Ésta es un área que amerita investigación y desarrollo, incluyendo el aspecto de implantación de iones. No sólo nuevos materiales, sino nuevas modalidades, como la incorporación de componentes ópticos en los microcircuitos, necesitan desarrollarse.



Un ejemplo de cómo la implantación de iones (en este caso de Au) en distintas direcciones puede modificar la textura de la superficie de los materiales (en este caso acero inoxidable). Se presentan ondulaciones de dimensiones nanométricas con diferentes orientaciones y longitudes de onda.

La implantación de iones en materiales no semiconductores como los metales se seguirá usando en aplicaciones especiales, como prótesis, moldes y dados de extrusión. En general, la implantación de iones aumenta la dureza y la resistencia al desgaste de los metales. Por lo que es útil para fa-

bricar piezas pequeñas pero estratégicas en una línea de manufactura. Con las técnicas de implantación desarrolladas hasta la fecha es posible implantar cualquier elemento en cualquier sustrato, abriendo enormes posibilidades de crear nuevos materiales, como aleaciones o nano-estructuras, de manera controlada en cuanto a su geometría y cantidad de implante, con alta precisión.

Los métodos analíticos que usan radiaciones, algunos de los cuales son no-destructivos, se han perfeccionado notablemente y seguirán mejorando. Éste es un uso de las radiaciones que da lugar a conexiones con otras áreas de la ciencia. Es de esperarse que la arqueología, la geología la biología y muchas otras disciplinas se vean beneficiadas cada vez más, y que algunas técnicas que ahora están en los inicios se vuelvan rutinarias. Sin embargo, la correcta aplicación requiere de personal especializado, en particular en la interpretación de las medidas.

Los experimentos de frontera de la ciencia son cada vez de mayor magnitud, y en buena parte requieren de colaboraciones entre varios países para desarrollarse. Los proyectos de investigación en física nuclear y sub-nuclear de manera natural requieren de la tecnología de las radiaciones: aceleradores, detectores, y aparatos asociados. Otras instalaciones de gran magnitud, que prometen desarrollarse, aunque no para la física nuclear, son las fuentes de fotones de alta intensidad (sincrotrones) y generadores de neutrones de alta intensidad, ambas basadas en aceleradores.

Hay cientos de reactores nucleares que producen energía eléctrica. Dadas las condiciones de recursos y ambientales, no es imposible que se incremente su uso a mediano plazo. Las fuentes no-renovables contaminan y se agotarán. Otros generadores de energía, al no ser rentables en gran escala, se usan limitadamente; su uso no se ha generalizado, ya sea por razones técnicas o políticas o económicas. Los reactores de fisión nuclear ya demostraron su rentabilidad en muchos países, incluyendo México. Para instalaciones nucleares hay, y seguirá habiendo, una importante actividad en el desarrollo de nuevas geometrías, sistemas de control, de seguridad, de transferencia de calor, así como blindajes, y de protección radiológica. Su futuro uso estará determinado por factores no siempre técnicos, como: demanda, contaminación, seguridad, proliferación, contingencias y opinión pública. Pero en todos estos aspectos se van a necesitar expertos en radiaciones.

A medida que se ha acumulado experiencia en el diseño y la operación de los reactores nucleares, se han logrado diseños más seguros. Esto incluye el diseño y la composición de los elementos combustibles, el mejoramiento

de sistemas de control, nuevos materiales moderadores, nuevos sistemas de enfriamiento y fluidos para extraer el calor, métodos para manejar los gases tóxicos que se generan y sistemas de protección radiológica. No hay duda que cada nuevo reactor que se construye es más seguro que los anteriores. El análisis de los accidentes que han sucedido a su vez ha aportado información que permite enfrentar futuras contingencias. Los accidentes no han involucrado explosiones nucleares, sino explosiones de origen químico. Los daños materiales y las bajas han estado localizados en la vecindad inmediata. La emisión de sustancias radiactivas ha obligado la evacuación temporal de la población unos kilómetros a la redonda, como medida precautoria. La medida de la contaminación radiactiva en las zonas afectadas ha permitido la estimación de la dosis recibida por la población y poner en perspectiva los efectos, por ejemplo, respecto a la dosis debida al fondo natural, o respecto a los daños debidos a accidentes de otra índole o desastres naturales.

La energía nuclear es de las menos contaminantes. Para formarse una opinión al respecto, se sabe que los desechos de la fisión del uranio son altamente radiactivos y requieren de un tiempo para disminuir su temperatura y su actividad. Normalmente los desechos se almacenan unos años en la vecindad de la planta hasta que sea posible de transportarlos. Luego la parte no-reciclable se lleva a un lugar cuya seguridad se debe garantizar por cientos o miles de años. Uno de los avances que se espera es el desarrollo de nuevos materiales resistentes a la radiación y a la corrosión que puedan servir como contenedores de desechos radiactivos por grandes lapsos. En contra de esta complicación, la gran ventaja es que todos los desechos se encuentran confinados. No hay emisión de humos ni gases contaminantes, como con los hidrocarburos o el carbón. Las áreas requeridas para el almacenamiento son mínimas si se comparan, por ejemplo, con las áreas inutilizadas por las presas. Esto significa un impacto mínimo en el medio ambiente, con la consiguiente reducción del calentamiento global.

Un tema que evoluciona según la experiencia es el de cuánta radiación tolera el humano. Está establecido que el fondo natural promedio es aproximadamente un mili-Sievert. Por otro lado, se sabe que una dosis equivalente de 250 mili-Sieverts comienza a producir efectos detectables en la salud; y a su vez una dosis que produce una alta probabilidad de deceso es 20 veces mayor. Entre la dosis de fondo y la de umbral de efectos detectables habrá un nivel que la población puede tolerar, principalmente en cuanto a efectos a largo plazo. Por su misma naturaleza, esta dosis es difícil de determinar, pero se ha usado el límite para personal expuesto por su

ocupación de 50 mili-Sieverts/año, y para la población en general la décima parte. Estos son valores arbitrarios, y probablemente conservadores. Existe la posibilidad de que cambien a medida que se conozca más, especialmente sobre las posibilidades de regeneración de daños; esto deberá estudiarse eventualmente. Si hay cambios, se verán afectadas las prácticas de manejo seguro de las radiaciones. Esto naturalmente abarca los usos médicos, que seguramente se irán perfeccionando y turnando accesibles cada vez a más sectores de la población.

Para ejemplificar el uso de radiaciones vamos a ahondar un poco en una de las técnicas, la implantación de iones, que se ha establecido como una manera de crear nuevos materiales. Como su nombre lo indica, se trata de introducir átomos extraños a un material para modificar sus propiedades. Esto se logra, podríamos decir, a “fuerza bruta”, pues se lanzan iones de los átomos extraños como proyectiles a alta velocidad sobre un blanco, forzando que se encajen y queden permanentemente implantados en el objeto. Para lanzar los iones se requiere de un acelerador de partículas, cuyo desarrollo originalmente fue motivado principalmente por la investigación nuclear.

Un implantador de iones es un acelerador diseñado para un uso específico. Algunas características que lo distinguen de otros aceleradores son las siguientes. Un implantador para investigación tiene la capacidad para acelerar cualquier tipo de ion. Con este objeto se han desarrollado fuentes de iones versátiles capaces de acelerar prácticamente cualquier átomo. Por otro lado, los implantadores para líneas de producción aceleran sólo un tipo de ion. Los voltajes que se emplean para acelerar los iones son moderados: desde algunos miles de voltios hasta algunos millones. Se usa el mejor vacío posible y campos magnéticos intensos. Usualmente se hace un barrido del haz de iones sobre la muestra para cubrir grandes áreas.

Hay grandes ventajas en poder introducir átomos nuevos en un material de manera controlada, a diferencia de otros métodos basados en solidificación convencional o difusión térmica. Una de las ventajas es la pureza de los átomos implantados, ya que con campos eléctricos y magnéticos, y con buen vacío, se seleccionan con gran precisión los iones a implantar, incluso a nivel isotópico. La cantidad de átomos implantados también se controla con precisión, pues el haz de iones constituye una corriente eléctrica que puede medirse y manejarse. El haz de iones es unidireccional, lo que permite la colocación exacta de los átomos. Típicamente se implantan entre 10^{12} y 10^{18} átomos por centímetro cuadrado. La profundidad a la que se depositan los átomos exóticos es del orden de algunos micrómetros, y es-

tá determinada por la energía cinética de los iones y por el alto voltaje del acelerador. Esto permite el manejo de capas muy delgadas cercanas a la superficie, lo cual resulta apropiado, por ejemplo, para la producción de microcircuitos.

La sola presencia de átomos extraños no es lo único que se debe considerar. Se debe tener en cuenta que al penetrar los iones veloces en el material le depositan su energía, lo cual se manifiesta de distintas maneras. Ya que el material absorbedor está formado por átomos en algún arreglo que depende del material, y que los proyectiles son objetos veloces de dimensiones parecidas, todos con cargas eléctricas distribuidas de manera dispareja, se debe recurrir a modelos simplificados para describir los procesos físicos que suceden. Para empezar, el absorbedor sufre un aumento de temperatura. En la vecindad de la trayectoria de cada ion puede subir miles de grados, y luego se disipa al resto de la muestra. Si no se controla externamente la temperatura, la muestra entera puede llegar a varios cientos de grados.

Cuando los iones se frenan y ceden energía a los electrones del absorbedor, éste se ioniza. El resultado es la emisión posterior de radiación secundaria, como rayos X, UV, luz visible o electrones. Eventualmente pueden producirse radicales libres y reacciones químicas. Si la energía se transfiere a los átomos completos del absorbedor éstos pueden desplazarse y por lo tanto generar modificación de la estructura del material. Incluso se forman cascadas de átomos desplazados y algunos pueden ser expulsados del material. Los desplazamientos atómicos dan lugar a defectos puntuales, como vacancias o intersticiales, en la red cristalina. Dependiendo de la temperatura los defectos pueden migrar para formar defectos extendidos o pueden recombinarse. Se nota que puede haber un gran daño estructural y por lo tanto un cambio en las propiedades morfológicas, mecánicas, ópticas o eléctricas. Una estructura cristalina puede fácilmente amorfizarse.

De lo anterior se puede ver que hay un sin fin de posibilidades de uso de la implantación de iones. Se puede hacer a temperatura controlada y por lo tanto sin depender de las propiedades térmicas del material. Nótese también que las propiedades de bulto del objeto no cambian, pues la implantación es esencialmente superficial.

Es deseable que el público en general adquiriera mayor conocimiento sobre las radiaciones. Con ello se ayudaría a corregir la opinión negativa y los temores que a veces se tienen, y a eliminar mitos. El uso de las radiaciones es una actividad como cualquier otra y tiene sus riesgos. Pero si éstos se conocen no hay razón para repudiar las radiaciones. Al contrario, son múltiples los beneficios que se pueden lograr. Tampoco hay porqué pen-

sar que no surgirán nuevos usos que ni siquiera nos imaginamos; así es la investigación y el desarrollo.

SOBRE LAS OBSERVACIONES EXPERIMENTALES EN LA FÍSICA DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS

*Alberto Robledo**

O FRECEMOS una descripción de la naturaleza, la diversidad, y la disponibilidad de colecciones de datos que constituyen las observaciones experimentales sobre los sistemas complejos. Hacemos referencia a los sistemas complejos más representativos en diferentes campos, como en la física misma, la geofísica, la ecología, la economía, los fenómenos sociales, las redes de comunicación, etc., y señalamos la abundancia y la accesibilidad de los datos que aguardan su confrontación con los modelos y formalismos teóricos en esta rama de la física.

La investigación de los sistemas complejos es esencialmente interdisciplinaria, abarca muchas áreas de conocimiento, y sin embargo revela un tronco común y profundas analogías y conexiones. Los sistemas complejos destacan por poseer un gran número de elementos, componentes, o grados de libertad, cuyo análisis demanda métodos estadísticos, y por lo tanto no es sorprendente su proximidad a la física estadística, la cual consecuentemente se ha vuelto más multidisciplinaria en tiempos recientes. Sin embargo el rasgo más característico de los sistemas complejos es la abundancia y ubicación de los datos que constituyen sus observaciones y mediciones experimentales.

Además de colecciones en hemerotecas y todo tipo de archivos históricos, geográficos, climatológicos, de población, gubernamentales, financieros, sociales, etc., estos datos se encuentran disponibles en un sinnúmero de páginas del Internet, de tal forma que su acceso es inmediato vía buscadores en el ciberespacio. Esta característica sin precedente tiene un efecto sobre la comunidad internacional de investigación en esta disciplina, pues da igualdad de circunstancias a individuos o grupos en sectores periféricos de desarrollo medio o incipiente respecto a sus contrapartes en los centros de investigación científica de mayor adelanto e infraestructura.

* Departamento de Sistemas Complejos, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

INTRODUCCIÓN

Según Wikipedia: “Un sistema complejo está compuesto por varias partes interconectadas o entrelazadas cuyos vínculos crean información adicional no visible antes por el observador. Como resultado de las interacciones entre elementos, surgen propiedades nuevas que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos aislados. Dichas propiedades se denominan propiedades emergentes. En contraposición, un sistema complicado también está formado por varias partes pero los enlaces entre éstas no añaden información adicional. Nos basta con saber cómo funciona cada una de ellas para entender el sistema. En un sistema complejo, en cambio, existen variables ocultas cuyo desconocimiento nos impide analizar el sistema con precisión. Así pues, un sistema complejo, posee más información que la que da cada parte independientemente.

Para describir un sistema complejo hace falta no solo conocer el funcionamiento de las partes sino conocer como se relacionan entre sí.” Además Wikipedia señala como ejemplos típicos de sistemas complejos a: “El clima atmosférico, los terremotos y los volcanes, los ecosistemas, los seres vivos, la conciencia, las sociedades y las ciudades”. Otros ejemplos notables no ajenos a los mencionados son la evolución biológica y la economía mundial. Añadimos, como muestras, el tránsito vehicular, las colonias de insectos, el Internet, el cerebro, el sistema inmunológico, etc. Desde hace aproximadamente tres décadas la comunidad científica ha efectuado progresos sustanciales sobre el entendimiento cuantitativo de los sistemas complejos empleando conceptos provenientes de la física, de la simulación computacional, y asimilando conocimientos de muchas disciplinas.



Figura 1: Panal de abejas como manifestación de una propiedad emergente. ¿Cómo es que esta estructura hexagonal precisa surge de un enjambre de individuos?

Es evidente la existencia de una enorme documentación sobre los sistemas complejos señalados en el párrafo anterior, la cual se ha acumulado y sistematizado a través de muchos años vía las observaciones y mediciones efectuadas por multitud de científicos en muchas disciplinas y por organizaciones involucradas en muchas actividades. Esta documentación constituye en la actualidad un caudal de datos experimentales para la investigación en sistemas complejos. A continuación presentamos una breve lista y descripción de los tipos mas representativos de sistemas complejos y comentamos sobre la existencia y disponibilidad de datos reales sobre ellos. Después explicamos la naturaleza de la investigación en este campo multidisciplinario de creación reciente que emplea conceptos y métodos de la física, en particular de la física estadística. Indicamos que la validación de las predicciones requiere de su corroboración con observaciones y mediciones frecuentemente ya documentadas, para lo cual adquiere importancia la ubicación de fuentes de datos. Mas adelante detallamos como el acceso a los datos experimentales se facilita mediante el empleo de métodos modernos de búsqueda y transmisión de información. Concluimos señalando los efectos que esta circunstancia de observación experimental tiene en la comunidad que cultiva esta disciplina.

EJEMPLOS DE SISTEMAS COMPLEJOS

Ejemplos de sistemas que desde algunas perspectivas califican como sistemas complejos en la física son abundantes en la materia condensada, en particular en aquellas instancias donde se requiere la física estadística para su entendimiento. Están incluidos los cristales, los magnetos, los vidrios y los superconductores. Entre los sistemas hidrodinámicos destacan los fluidos no newtonianos y los flujos granulares, la formación de patrones simultáneos en espacio y tiempo en osciladores químicos y otros medios excitables. Los sistemas cuya estructura consiste de auto ensamble molecular, biomoléculas y los materiales de interés en la nanotecnología, los fenómenos de doblamiento y desdoblamiento de proteínas y las propiedades de las macromoléculas. La investigación experimental de estos sistemas se efectúa bajo patrones tradicionales de la física de la materia condensada y no comentaremos sobre estos aquí en mayor detalle.

Un ejemplo de sistema complejo en astrofísica es la estructura jerárquica de los cuerpos celestes y en la geofísica las propiedades de escala de los rasgos terrestres. Son sistemas complejos aquellos donde ocurren fenómenos tales como las tormentas solares, el clima, los terremotos, etc.

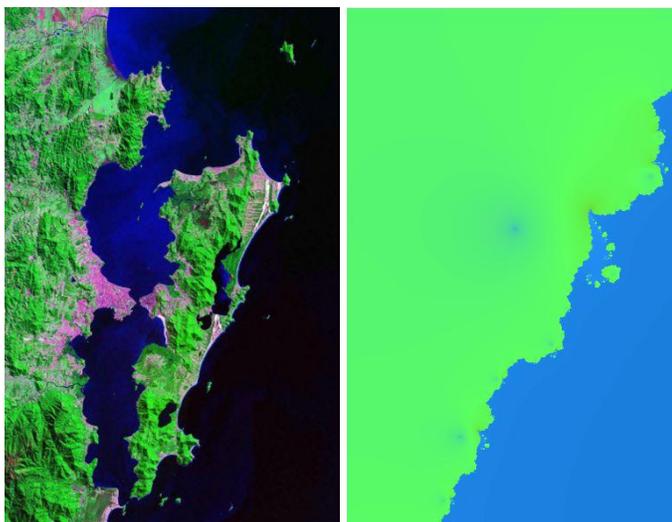


Figura 2: Sistema complejo en geofísica. Comparación visual simple entre una línea costera real (retocada con color), a la izquierda, y el borde de un objeto fractal generado por computadora, el conjunto de Mandelbrot, a la derecha. Ciertas propiedades estadísticas de ambos no varían ante cambios de escala. Ver texto.

Los sistemas ecológicos y la evolución biológica ofrecen ejemplos típicos de sistemas complejos. Las observaciones de una multitud de aspectos de la biosfera generan representaciones de sistemas complejos en pleno funcionamiento. Estudios de la evolución a lo largo de distintas eras de estos mismos sistemas constituyen ejemplos de sistemas complejos.

Muchos aspectos de las sociedades humanas proporcionan ejemplos genuinos de sistemas complejos, algunos de los cuales se prestan a ser estudiados cuantitativamente, pero otros presentan dificultades para enmarcarlos mediante conceptos que aceptan valores numéricos. En tiempos recientes se estudian activamente sistemas complejos que involucran las características que diferencian a las sociedades humanas, sus ciudades y las redes que generan y utilizan para sus comunicaciones.

En las economías y mercados financieros abundan en sus diferentes niveles ejemplos de sistemas complejos, tales como en las áreas de manufacturas, centros financieros y empresas, cuyas interacciones con los consumidores generan sistemas económicos. Métodos de estudio diseñados a imagen de aquellos de la física han sido desarrollados en los últimos años y han producido contribuciones al estudio de la economía, dando lugar a la creación de un área de investigación denominada econofísica.

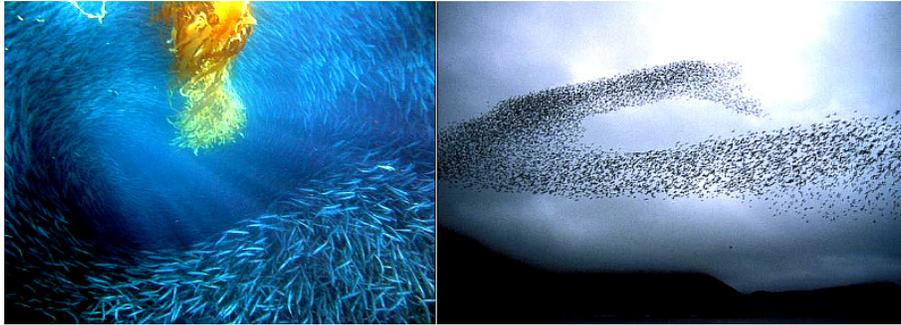


Figura 3: Vistos como sistemas complejos la auto organización de individuos de una especie en grupos o enjambres es una propiedad emergente. Los patrones que generan ayudan al grupo a cumplir tareas que en lo individual son imposibles. Ver texto.

CARÁCTER DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS COMPLEJOS

Como hemos hecho referencia, los sistemas complejos estudiados en diversas disciplinas generalmente están compuestos de muchas unidades o grados de libertad que interactúan entre sí. Estas unidades frecuentemente pueden agruparse en bloques y estos a su vez formar nuevos bloques y dar lugar a una superestructura jerárquica. Tal es el caso de los objetos astronómicos, los organismos biológicos, los ecosistemas, las empresas y corporaciones en la economía, las organizaciones militares, las conglomeraciones urbanas, etc. Estos sistemas poseen propiedades individuales y propiedades colectivas, estas últimas llamadas también propiedades emergentes. La investigación teórica de estos sistemas está vinculada a los métodos de la física estadística, los cuales han sido diseñados originalmente para el estudio de fenómenos colectivos en sistemas atómicos y moleculares. Entre los formalismos teóricos más comunes en el análisis de los sistemas complejos se encuentran, la teoría de la información, la teoría de juegos, la dinámica no lineal, los autómatas celulares, la teoría de las redes. Estos formalismos se apoyan además en métodos numéricos y computacionales.

Sistemas de agentes

Un método de estudio de los sistemas complejos que refleja el carácter de los procedimientos computacionales en la física estadística es el de la simulación numérica de modelos constituidos por agentes o individuos que interactúan entre sí. En estos modelos se presuponen las característi-

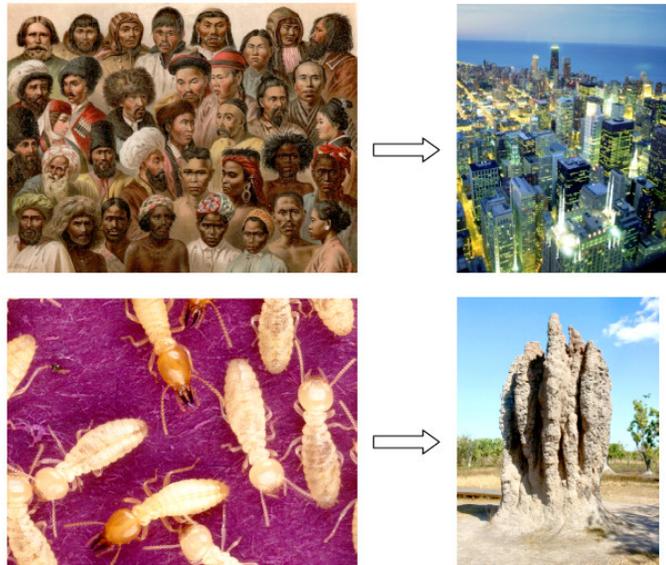


Figura 4: Sociedades formadas por individuos marcadamente diferentes, tanto en su escala de tamaño como en su complejidad biológica, originan estructuras similares en sus construcciones.

cas e interacciones de los agentes y se presenta como un objetivo el que las propiedades emergentes aparezcan espontáneamente a través de la simulación.

Teoría de la información

Una técnica que se aplica a datos pertenecientes a sistemas complejos para extraer propiedades de ellos ocultas o no perceptibles a primera vista es la teoría de la información. Ciertos patrones de datos no son discernibles mientras que otros, por ejemplo los periódicos o recurrentes si lo son. Estos últimos contienen poca información dado que la repetición de símbolos es predecible. La teoría de la información ayuda a la detección de estructuras en moléculas de interés biológico, en redes, en sistemas dinámicos, en el Internet, etc.

Teoría de juegos

Una característica común a muchos sistemas complejos es una evolución temporal a lo largo de la cual se adapta el comportamiento colectivo

optimizando ciertas propiedades. Esta característica se ilustra claramente en la evolución biológica gobernada por la selección natural. Los individuos que compiten por recursos provocan situaciones límite entre especies biológicas que pueden considerarse fenómenos emergentes. El formalismo matemático que se ha desarrollado para modelar estos comportamientos es la Teoría de Juegos, en la cual se definen estrategias que reditúan en ganancias o pérdidas para los individuos o agentes.

Teoría de redes

Una forma común en la descripción de la estructura y el funcionamiento de los sistemas complejos es su representación en términos de redes. La topología de estas redes y la manera en que esta imprime sus propiedades de conectividad es importante. A través de ellas se comprenden las interacciones entre individuos o grupos de ellos, lo mismo que su estructura jerárquica, si este es el caso. Basta mencionar las redes sociales, las de comunicación humana, el Internet, etc.

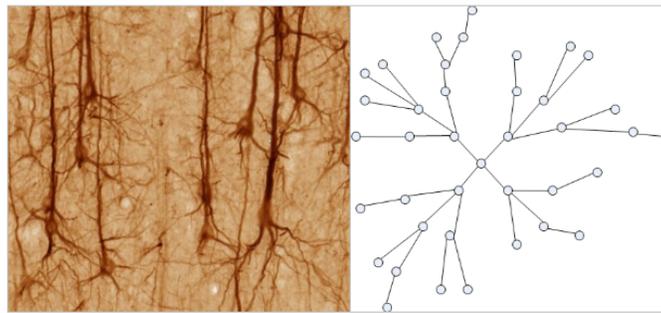


Figura 5: Los sistemas complejos a menudo tienen la estructura de una red, como los retículos de neuronas en el cerebro (izquierda), los tejidos que forman los organismos vivos, incluso las redes sociales. La teoría de redes o grafos parte de una definición sencilla que consiste en un conjunto de puntos entre los que se definen enlaces (imagen derecha).

Escalamiento

El concepto de escalamiento, o invariancia ante cambios de escala, tuvo sus primeros desarrollos y aplicaciones en el fenómeno crítico y las transiciones de fase en la física de la materia condensada. Un campo del conocimiento donde este concepto tuvo un importante desarrollo es en las llamadas transiciones al caos en sistemas no lineales discretos. Un rasgo

general muy notable en los sistemas complejos es la presencia de distribuciones que manifiestan leyes de potencia y que implican la propiedad de escalamiento. El esclarecimiento de los mecanismos responsables de estas leyes de potencia es un tema central en el estudio de los sistemas complejos.

Dinámica no lineal

Un método que ha resultado muy fructífero en el estudio de los sistemas complejos es aquel en el cual la evolución temporal de las propiedades individuales o colectivas de los agentes que constituyen el sistema se representan como modelos dinámicos no lineales. Estos pueden definirse matemáticamente vía ecuaciones diferenciales, o mediante ecuaciones de diferencias finitas en variables temporales y/o espaciales. Las propiedades emergentes de los sistemas complejos se presentan bajo estos formalismos como bifurcaciones y transiciones al caos.

OBSERVACIONES Y DATOS EXPERIMENTALES SOBRE SISTEMAS COMPLEJOS

Como acabamos de señalar, las actividades de investigación en los sistemas complejos están primordialmente enfocadas a desarrollos teóricos. Un aspecto característico del estudio de los sistemas complejos surge cuando quienes efectúan estas investigaciones tienen una formación en física y el tema específico de estudio corresponde a sistemas ajenos a la física. En estos casos, que son los más frecuentes, se requiere la adquisición de conocimientos interdisciplinarios o de la colaboración con investigadores de otras disciplinas. Naturalmente, las observaciones y datos experimentales de este tipo de sistemas se ubican dentro del dominio o campo de acción de sus disciplinas científicas tradicionales. En general se cuenta con abundancia de datos, que representan los resultados de observaciones y mediciones, que se han acumulado durante largos periodos, y que se encuentran almacenados en diversos archivos y medios. Los datos sobre estos sistemas aguardan su confrontación con los modelos y formalismos teóricos en esta rama interdisciplinaria de la investigación científica. Las tareas a realizar son la de determinar su ubicación, hacer acopio de ellos, y, si es necesario, depurarlos para su empleo.

Un tipo de datos de utilidad para investigaciones sobre sistemas sociales y económicos son los que generan los censos de población, de entidades económicas y de colectividades agropecuarias. Estos trabajos de recopilación de información estadística incluyen muchas variables, producción nacional, confianza de consumidores, recuentos de individuos por edades y

otras características, muestras de proporción de comercios; estadísticas de ocupación y empleo, educación, de violencia intrafamiliar y de pareja, etc.

Las bases de datos sobre el medio ambiente y el clima apoyan una amplia variedad de investigaciones aplicadas sobre propiedades y fenómenos de nuestro planeta. Estas bases de datos ofrecen acceso en línea, por ejemplo, el [Environmental Data Explorer](#) mantiene mas de 500 variables a niveles de nación, subregión, región y global, que cubren temas como acuíferos, vegetación, clima, población animal y humana, emisiones, salubridad, etc. Otro ejemplo es [WorldClimate.com](#) el cual contiene mas de 85,000 récords históricos sobre el clima mundial.

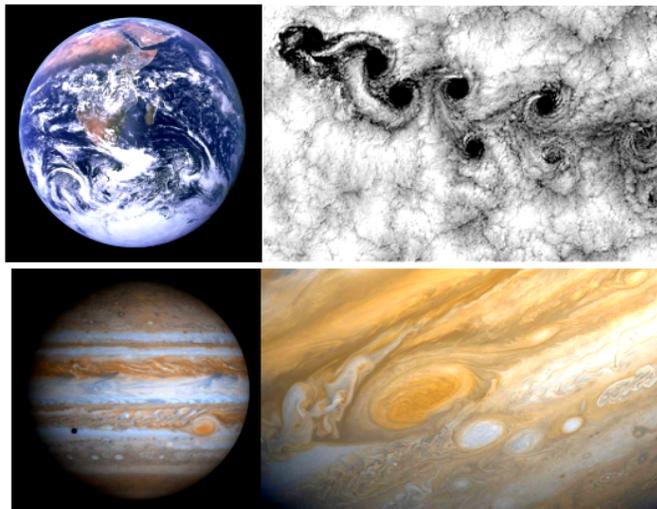


Figura 6: La turbulencia en los fluidos es un fenómeno complejo que se estudia con la dinámica no lineal (ver texto) y tiene una importancia crucial en el estudio del clima no solo en nuestro planeta, sino también en el de cualquier atmósfera planetaria.

Datos sobre desastres naturales ocurridos en todas partes del mundo pueden obtenerse vía el Internet. Existe documentación exhaustiva a partir de 1900 con fechas de inicio y término, país y ubicación local, tipo de desastre, costo económico, víctimas fatales y número de afectados, tendencias basadas en geografía, frecuencia y naturaleza de los eventos, etc. Idénticamente, puede consultarse información sobre mas de 500 guerras y conflictos humanos a partir de 1816 con datos sobre su localización, propósito, participantes, y que incluyen luchas de independencia en reinos e imperios, etc.

El caso de las epidemias ha generado muchas investigaciones sobre los

sistemas complejos ya que se ha querido desarrollar un entendimiento preciso de como éstas se propagan. Este campo es muy sensible a aspectos culturales y las redes sociales que involucran. La contención de la epidemia SARS que se originó en 2002 fue especialmente complicada por la complejidad de la estructura de viajes de la sociedad del siglo XXI. Un individuo en una zona rural de China puede un día ser contagiado y tomar un vuelo comercial unos días después diseminando una enfermedad altamente infecciosa que se dirigen mayoritariamente a un destino geográfico, pero puede rápidamente dirigirse a otros lugares distantes. En contraste, el SIDA es relativamente poco contagioso y su propagación está restringida a redes sociales específicas. El análisis de los patrones de infección de enfermedades tales como la sífilis, polio, tuberculosis, etc., requiere de suposiciones sobre la interdependencia entre la naturaleza del padecimiento y las redes sociales a través de las cuales se pudiera propagar.

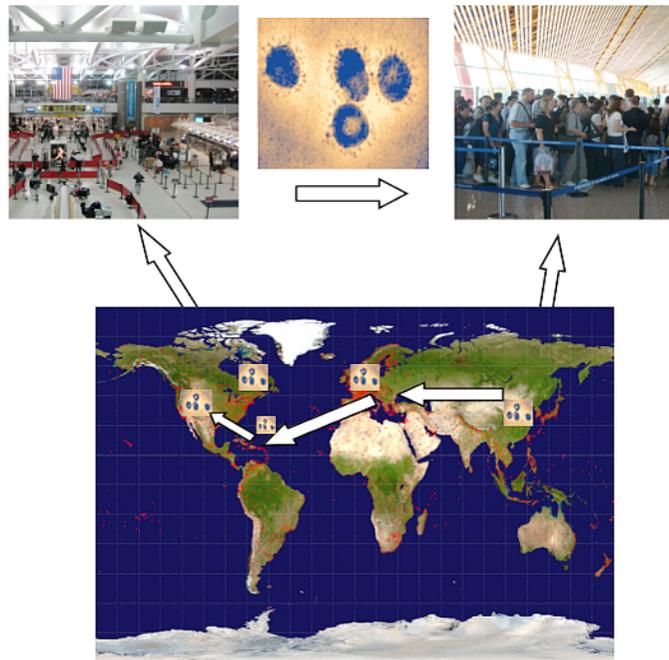


Figura 7: Propagación de una epidemia moderna. La red compleja del transporte aéreo imprime sus características a la propagación de enfermedades como el SARS en todo el mundo, produciendo pandemias con potencial global. Ver texto.

El conocimiento científico de los patrones estadísticos que caracterizan la movilidad humana es un reto muy actual para los investigadores en el

área de los sistemas complejos, quienes requieren de información real específica para contrastar con las predicciones de modelos sobre trayectorias y mecanismos de movimientos humanos. Este entendimiento tiene muchas aplicaciones en la práctica: el control del tráfico urbano, terrestre, y aéreo, la planificación de espacios urbanos, la propagación de información y el comercio global, etc. En los últimos años las tecnologías digitales avanzadas han proveído enormes cantidades de datos sobre actividades humanas que revelan aspectos de la movilidad humana. Por ejemplo, las observaciones sobre circulación de moneda en papel, récords de comunicación telefónica celular, redes sociales basadas en ubicación, datos de localización GPS de vehículos, identificación de trayectos vía radio frecuencia, etc.

Un caso particular es el de las redes de aerolíneas para las cuales, como ilustración, la Bureau of Transportation Statistics (BTS), provee datos en su página de Internet www.bts.gov. Esta base de datos contiene cifras sobre el mercado doméstico de las compañías aéreas estadounidenses que agregan mensualmente fichas sobre aerolínea, origen, destino, clase de servicio, número de pasajeros, carga comercial, correo, etc.



Figura 8: El tráfico aéreo establece esquemas contemporáneos de movilidad humana, su estudio involucra el empleo de la teoría de redes alimentada con información real proveniente sobre diversos datos generados por las compañías aéreas.

Otro caso de interés es el tráfico en el Internet, la popularidad de sitios y páginas, individuales o secciones dentro de sitios. Este tráfico puede ser analizado observando las estadísticas en el archivo de acceso en el servidor del Internet (lista de las páginas servidas que es generada automáticamente). El tráfico en la Web se mide en ocasiones mediante “olfateo de paquetes” (*packet sniffing*) que genera un muestreo al azar a partir del cual

se extrapola información global del tráfico en la totalidad del ciberespacio. Son variables de interés el número de visitantes, el número promedio de visitas por visitante, la duración promedio de las visitas, clases de dominios, horarios de mayor ocupación, páginas mas solicitadas, trayectorias o secuencias de visita mas frecuentes, etc.

Podríamos extender la lista de bases de datos relevantes al estudio de los sistemas complejos prácticamente sin límite, incluyendo por ejemplo observaciones en las finanzas, tales como los tipos de cambio de las monedas, las cotizaciones de las bolsas de valores, las transacciones comerciales, etc. Lo mismo sobre el periodismo electrónico, las propiedades estadísticas de los blogs, tweets y memes, los juegos cibernéticos, que constituyen temas de investigación contemporánea en el campo de los sistemas complejos. Igualmente podríamos hacer referencia a los sistemas ecológicos, la biodiversidad, etc. Y muchas otras áreas. Seria quizá mas adecuado terminar esta sección refiriéndonos a la minería de datos.



Figura 9: Las bolsas de valores consisten de un intrincado sistema de variables interdependientes por lo que poseen una complejidad elevada.

Según Wikipedia “La minería de datos ... es un campo de las ciencias de la computación referido al proceso que intenta descubrir patrones en grandes volúmenes de conjuntos de datos. Utiliza los métodos de la inteligencia artificial, aprendizaje automático, estadística y sistemas de bases de datos. El objetivo general del proceso de minería de datos consiste en extraer información de un conjunto de datos y transformarla en una estructura comprensible para su uso posterior.” Añade, “ La tarea de minería de datos real es el análisis automático o semi-automático de grandes cantida-

des de datos para extraer patrones interesantes hasta ahora desconocidos, como los grupos de registros de datos, registros poco usuales (la detección de anomalías) y dependencias"... Los términos relacionados con el dragado de datos, la pesca de datos y espionaje de los datos se refieren a la utilización de métodos de minería de datos".

CONCLUSIONES

Hemos hecho una breve reseña de las características especiales que ha adquirido hoy en día la investigación científica de los llamados sistemas complejos. Estos sistemas pertenecen frecuentemente a áreas del conocimiento ajenas a la física como lo son la biología, la ecología, la geografía, la cosmografía, la economía, la sociedad, los fenómenos de la comunicación moderna, etc. Es una rama de la investigación científica multidisciplinaria, la cual, sin embargo, emplea métodos y tecnologías originados en la física, en particular en la física estadística. Como toda actividad científica la investigación de los sistemas complejos está constituida por desarrollos teóricos que se comparan con observaciones efectuadas en, y datos obtenidos de, sistemas reales, existentes. La circunstancia especial de esta información experimental, en esta etapa de desarrollo de esta disciplina, es la presencia de una abundante cantidad de datos relevantes de un enorme número de sistemas complejos. Esta circunstancia ofrece oportunidades y retos. Entre las primeras está la disponibilidad de observaciones cuantitativas sin necesidad, por ejemplo, de trabajo de campo, de diseño de equipos de medición, y de montaje de laboratorios. Y entre las segundas, la dificultad de identificación, ubicación e interpretación de datos relevantes a las teorías y modelos que tienen potencial de generar aperturas hacia un entendimiento más profundo de estos sistemas, de descubrimiento de propiedades generales, y de revelación de leyes fundamentales.

Como el físico de antaño, el trabajo teórico y el experimental en los sistemas complejos es realizado por un mismo individuo o grupo, ahora apoyado por las técnicas modernas de acceso al ciberespacio y el procesamiento de datos obtenidos por este medio. Es irónico, pero apropiado, que el nombre de un centro de investigación en sistemas complejos se denomina [Observatorio de Sistemas Complejos](#) . Las características de la investigación actual en los sistemas complejos implican igualdad de circunstancias en cuanto a competitividad en una comunidad científica que mantiene en general desigualdades en tradición e infraestructura entre centros altamente desarrollados y centros de creación más recientes en países con menor

tradición científica.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la cooperación del M. en C. Álvaro Díaz Ruelas. Se recibió apoyo PAPIIT UNAM (IN104417).

BIBLIOGRAFÍA

Referencia general: Mitchell M. *Complexity: A Guided Tour*, Oxford University Press, Oxford, 2009.

Sethna J. P. *Statistical Mechanics: Entropy, Order Parameters and Complexity*, Oxford University Press, Oxford, 2006.

Ver capítulos relevantes en Meyers R.A. (Ed.). *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer Verlag, New York, 2009.

Solé R. y Goodwin B. *Signs of Life: How Complexity Permeates Biology*. Basic Books, New York, 2002.

Batty M. *Cities and complexity*. MIT Press, Cambridge, MA, 2007.

Mantegna R. N. y Stanley H. E. *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

Page S. E. En: Blume L. y Durlauf S. (Eds.). *Agent based models*. The New Palgrave Encyclopedia of Economics, Palgrave Macmillan, Basingstoke, 2008, 2nd edición.

Cover T. M. y Thomas J. A. *Elements of Information Theory*. John Wiley, New York, 1991.

Strategy: An Introduction to Game Theory, J.Watson (Norton, New York, 2007), 2nd edition.

Cohen R. y Havlin S. *Complex Networks: Structure, Stability and Function*. Cambridge University Press, Cambridge, 2010.

Newman M. E. J. *Power laws, Pareto distributions and Zipf's law*. Contemporary Physics 46, 323–351 2005.

Strogatz S. H. *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.

Wolfram S. *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Champaign, IL, 2002.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES: UNA APLICACIÓN EXITOSA DE LA INSTRUMENTACIÓN Y LA ANTIMATERIA

*Mercedes Rodríguez Villafuerte y Héctor Alva Sánchez**

EN la actualidad, existen algunas propuestas sobre el posible uso de la antimateria en nuestra vida cotidiana: para la generación de energía, como una fuente de combustible o bien para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Sin embargo, el gran costo que implica generar y almacenar antimateria en los grandes laboratorios no ha permitido concretar la mayoría de estas propuestas.

El único caso exitoso del uso de la antimateria hoy en día está plasmado en la tomografía por emisión de positrones (PET). La PET es una técnica de la medicina nuclear molecular que utiliza positrones –las antipartículas de los electrones- para visualizar partes específicas del cuerpo humano a través de la detección de fotones de aniquilación, producto de la transformación de la masa en energía del par positrón-electrón. Las imágenes producidas en PET proveen información metabólica y fisiológica de procesos moleculares o celulares en diferentes órganos y tejidos. El gran avance de la PET en las últimas décadas se debe, en buena medida, a la posibilidad de producir de una manera eficiente y con costos razonables sustancias radiactivas emisoras de positrones que pueden ser utilizadas para marcar fármacos, los cuales son diseñados para seguir y estudiar diferentes vías metabólicas dentro de los pacientes. Por otro lado, el desarrollo de instrumentación muy sofisticada para los grandes experimentos con aceleradores de partículas (como aquellos realizados en el CERN, Fermilab y DESY, por mencionar algunos) ha permitido utilizar detectores de radiación muy rápidos y eficientes que permiten el registro en coincidencia de los fotones de aniquilación. También ha sido importante la creación de algoritmos matemáticos basados en métodos estadísticos, aunado al uso de computadoras con procesadores cada vez más veloces y potentes, lo que ha permitido la

* Departamento de Física Experimental, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

reconstrucción de imágenes tomográficas con información cuantitativa de alta precisión.

En este capítulo se discutirán los conceptos básicos de la tomografía por emisión de positrones, las características de los detectores utilizados, sus diferentes geometrías de configuración, y se mencionarán las diferentes técnicas básicas de reconstrucción de imágenes tomográficas. Se hará particular énfasis en la descripción de sistemas clínicos (para seres humanos) y se presentarán los retos que implica el diseño de sistemas para animales pequeños.

LA ANTIMATERIA

Los positrones son las antipartículas de los electrones y su existencia fue predicha por el físico Paul Dirac en 1928. Los positrones fueron descritos por Dirac como “partículas que parecieran ser una especie en espejo de los electrones, difiriendo de ellos sólo en el signo de su carga eléctrica”. Su predicción se originó a partir de una ecuación que describía el comportamiento de un electrón moviéndose a velocidades relativistas y cuya solución establecía que para cada partícula existe su antipartícula, con características idénticas excepto por su carga eléctrica. En 1932 el físico experimental Carl D. Anderson confirmó la existencia del positrón a partir de observaciones experimentales con rayos cósmicos que incluían partículas con la masa del electrón pero que, en presencia de un campo magnético, su trayectoria indicaba una carga positiva. Estos dos hechos históricos en tan sólo pocos años fueron el comienzo para generar una gran inquietud e interés entre la comunidad científica por desarrollar investigación acerca de la antimateria. Desde entonces se han hecho descubrimientos importantes de antipartículas de muy diversos tipos entre los que se incluyen antiprotones, antineutrones, antimuones o, inclusive estructuras más complejas como el antihidrógeno (formado por un antiprotón y un positrón). Sin embargo, hoy en día se puede afirmar que sólo una aplicación exitosa del uso de la antimateria se ha dado en la práctica, que además tiene un impacto determinante en la medicina: se trata de la tomografía por emisión de positrones (PET).

El descubrimiento de la antimateria no fue el único ingrediente clave para el desarrollo y puesta en la práctica clínica la técnica de PET. Fueron necesarios avances importantes en instrumentación científica, como lo fue la invención del ciclotrón (un acelerador de partículas -protones y deuterones- utilizadas para bombardear elementos y explorar la naturaleza de su nú-

cleo atómico), el descubrimiento de la radiactividad artificial por los esposos Joliot-Curie, desarrollos en las áreas de detectores, cómputo, electrónica y radioquímica, además de la propuesta y uso de algoritmos matemáticos para la reconstrucción de imágenes tomográficas. La Tabla 1 muestra una línea de tiempo que ayuda a identificar de una manera breve y concisa los eventos históricos más relevantes para el desarrollo exitoso de la tomografía por emisión de positrones.

1928	Predicción de la existencia de antimateria por Paul Dirac de la Universidad de Cambridge, GB (Premio Nobel de Física, 1933).	1930	Invencción del ciclotrón por Ernest Lawrence de la Universidad de California Berkeley, EUA (Premio Nobel de Física, 1939).
1932	Descubrimiento del positrón por Carl Anderson del California Institute of Technology, EUA (Premio Nobel de Física, 1936).	1934	Descubrimiento de la radiactividad artificial por Irène y Frédéric Joliot - Curie del Institut du Radium, Francia (Premio Nobel de Química, 1935)
1951	William Sweet y Gordon Brownell del MGH, EUA, proponen usar los fotones de aniquilación para localizar tumores cerebrales con detectores de NaI(Tl).	1973	Michael Phelps y Edward Hoffman de la Universidad de Washington, EUA, construyen un escáner PET de 24 detectores fijos de NaI(Tl).
1976	Síntesis de la [¹⁸ F]fluorodeoxiglucosa por Al Wolf y Joanna Fowler del Brookhaven National Laboratory, EUA.	1978	Primer escáner PET construido con cristales BGO por Chris Thompson del Montreal Neurological Institute, Canadá.
1990	Descubrimiento del oxiorfosfato de lutecio (LSO) por Charles Melcher de Schlumberger Technology Corporation, EUA.	1997	Primer escáner microPET para animales pequeños construido con cristales LSO por Simon Cherry de la Universidad de California los Ángeles, EUA.
2000	Primer escáner PET/CT por David Townsend de la Universidad de Ginebra y Ronald Nutt de la compañía CTI, EUA.	2018	Desarrollo del primer escáner PET de cuerpo completo por Simon Cherry y Ramsey Badawi de la Universidad de California, Davis, EUA.

Tabla 1: Línea de tiempo en la tomografía por emisión de positrones.

TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES (PET)

La tomografía por emisión de positrones es una técnica no invasiva de medicina nuclear molecular para el diagnóstico y seguimiento de enfermedades. Utiliza compuestos marcados con elementos radiactivos emisores de positrones (denominados radiofármacos) los cuales son administrados al paciente para producir imágenes en dos o tres dimensiones. Estas imágenes representan la distribución espacio-temporal del radiofármaco en los diferentes órganos y tejidos, y dan información sobre procesos bioquímicos a nivel celular o molecular a partir de las trayectorias que sigue el radiofármaco dentro del cuerpo humano. La PET permite detectar cambios tempranos en la fisiología debido a alguna enfermedad aún antes de que se presenten los primeros síntomas o aparezcan alteraciones anatómicas.

Entre los radionúclidos emisores positrones más importantes utilizados en PET se encuentran el ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O y ^{18}F , este último con propiedades químicas similares a las del hidrógeno. Un aspecto conveniente de estos elementos radiactivos es que la composición química de los tejidos incluye a sus isótopos estables, por lo que el etiquetado radioactivo de moléculas de interés biológico se puede hacer de una manera relativamente fácil. Una desventaja, sin embargo, es la vida media tan corta de estos radionúclidos (ver Tabla 2) haciendo necesario, en algunos casos, que su producción se tenga que hacer *in situ*.

Además de requerir una vida media suficientemente larga para poder realizar el estudio PET, una propiedad física relevante de los positrones emitidos durante el decaimiento es su energía cinética, la cual determina la distancia a la cual ocurre la aniquilación del positrón con respecto a la posición en donde ocurrió el decaimiento β^+ (que es la posición que registra el escáner PET). Esta ambigüedad entre las posiciones donde ocurrió el decaimiento y la aniquilación del positrón, además de la falta de colinealidad en la emisión de los fotones de aniquilación, establecen una limitante física ineludible en la máxima resolución espacial que pueden alcanzar los escáneres PET.

Los radiofármacos en medicina nuclear molecular se diseñan para que sigan una trayectoria metabólica determinada; las tasas de acumulación y eliminación, así como la biodistribución en el organismo, y por lo tanto la información que proporciona un estudio PET, depende de la naturaleza química del radiofármaco administrado. Las características más importantes que se desean de un radiofármaco es que tenga alta especificidad, sensibilidad y precisión en el diagnóstico. El radiofármaco más utilizado en la

Radionúclido	Vida media	Fracción β^+	Energía β^+ (MeV)		Alcance en agua (mm)	
			Promedio	Máxima	Promedio	Máximo
^{11}C	20.4 min	0.99	0.39	0.96	1.03	3.9
^{13}N	9.96 min	1.00	0.49	1.19	1.32	5.1
^{15}O	123 s	1.00	0.74	1.72	2.01	8.0
^{18}F	110 min	0.97	0.25	0.64	0.64	2.3
^{68}Ga	68.3 min	0.88	0.84	1.90	2.24	8.9
^{82}Rb	1.3 min	0.95	1.52	3.35	4.29	16.5

Tabla 2: Propiedades relevantes de radionúclidos emisores de positrones utilizados en PET (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O y ^{18}F son producidos en ciclotrón, mientras que ^{68}Ga y ^{82}Rb en generador)

actualidad, en parte por su vida media relativamente larga, es la fluorodeoxiglucosa (FDG) marcada con ^{18}F . La [^{18}F]FDG es una molécula análoga a la glucosa y se utiliza para estudiar la actividad glucolítica normal y patológica, como la de las células que tienen una tasa metabólica alta. Por ejemplo, la captación de FDG por los tumores cerebrales primarios de alto grado tiende a ser alta y una acumulación alta de FDG por tumores de bajo grado es generalmente una indicación de anaplasia a tumores de mayor malignidad. La FDG también tiene aplicaciones importantes en otras ramas de oncología para la detección temprana de metástasis, en otros padecimientos neurológicos (demencias, epilepsias, procesos infecciosos, entre otros) y cardiológicos. En el caso de los estudios neuro-oncológicos, más del 90 % se realizan con FDG a pesar de su baja especificidad y sensibilidad. Además del FDG, se han desarrollado otro tipo de radiofármacos para PET marcados con ^{18}F , algunos de ellos listados en la Tabla 3.

Asimismo, existen una gran variedad de radiofármacos marcados con ^{11}C , ^{13}N y ^{15}O con los cuales es posible marcar casi cualquier molécula orgánica. Ejemplos de estos radiofármacos se pueden encontrar en (Ávila-Rodríguez y Alva-Sánchez 2010). Actualmente existe un gran interés y el gran reto de desarrollar otros radiofármacos, algunos marcados con elementos “no convencionales” con vidas medias más largas para estudiar procesos metabólicos con escala de tiempo mayor, o bien utilizar estructuras moleculares más complejas como péptidos, anticuerpos monoclonales o proteínas para mejorar tanto la especificidad como la sensibilidad de los estudios PET.

Radiofármaco	Aplicación
[¹⁸ F]Fluorodesoxiglucosa	Metabolismo de glucosa
[¹⁸ F]Fluoruro de sodio	Lesiones óseas benignas y malignas
[¹⁸ F]Fluorotimidina	Proliferación celular
[¹⁸ F]Fluoromisonidazol	Hipoxia
[¹⁸ F]Fluoroestradiol	Densidad de receptores de estrógenos
[¹⁸ F]Fluorodopamina	Transporte activo de dopamina (Parkinson)
[¹¹ C]Acetato	Metabolismo β oxidativo
[¹¹ C]Raclopride	Densidad de receptores dopaminérgicos (D2)
[¹¹ C]Tetrabenazina	Transporte vesicular de monoaminas (VMAT2)
[¹¹ C]Amoníaco	Perfusión cardiaca

Tabla 3: Algunos radiofármacos para PET y sus aplicaciones (Ávila-Rodríguez y Alva-Sánchez 2010.)

PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA DETECCIÓN EN COINCIDENCIA

Una vez que se administra el radiofármaco al paciente, los positrones emitidos por los núcleos avanzan en los tejidos recorriendo distancias pequeñas (típicamente de algunas décimas de milímetro) perdiendo paulatinamente su energía cinética, principalmente a través de interacciones Coulombianas. Finalmente el positrón, normalmente de baja energía, se puede combinar con un electrón de espín opuesto produciendo 2 fotones de aniquilación (debido a la conversión de masa en energía) o puede formar un positronio, un átomo “exótico” inestable. La vida media del positronio¹ es en promedio de 125 ps y su decaimiento es a través de la aniquilación produciendo simultáneamente dos fotones de aniquilación. En cualquiera de estos dos tipos de aniquilaciones, los fotones emitidos tienen una energía de 511 keV y viajan a $180^\circ \pm 0.25^\circ$, independiente del tipo de radionúclido utilizado. La falta de colinealidad de los fotones de aniquilación se debe a que el positrón tiene, frecuentemente, una pequeña cantidad de momento residual cuando se aniquila con el electrón.

El principio físico de formación de imágenes en PET consiste en la detección en coincidencia de los 2 fotones de aniquilación, lo cual implica el uso sincronizado de detectores colocados en posiciones opuestas y de su

¹La aniquilación del positronio también puede ocurrir a través de la producción de tres fotones, con una vida media de 145 ns, con una probabilidad de ocurrencia $1,1 \times 10^3$ menor a aquella que produce dos fotones. Este tipo de aniquilación no es útil para formar imágenes en PET debido al principio físico de funcionamiento de este último.

registro dentro de ventanas temporales de algunos ns. Cada par de fotones detectados definen una línea, denominada línea de respuesta, a lo largo de la cual ocurrió la aniquilación del positrón dentro del sujeto. La detección en coincidencia, también conocida como colimación electrónica, tiene la gran ventaja de aumentar la sensibilidad del equipo debido a que no es necesario utilizar un colimador físico para conocer las líneas de respuesta.

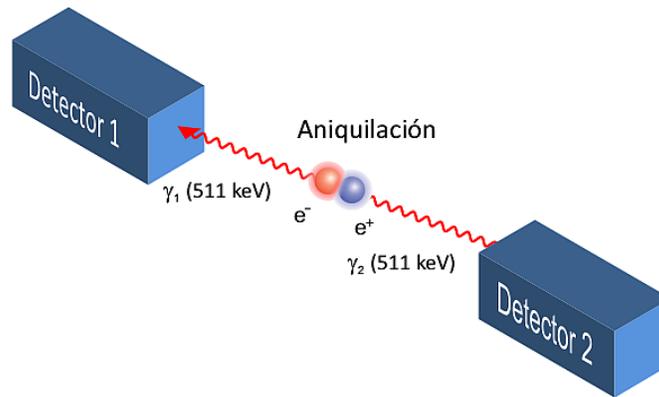


Figura 1: Detección en coincidencia de los fotones de aniquilación utilizando dos detectores colocados a 180° entre sí y sincronizados para funcionar con ventanas temporales de algunos ns.

Las imágenes producidas en PET se forman a partir de millones de eventos en coincidencia registrados durante un estudio. Para incrementar la eficiencia de detección, los detectores se colocan a lo largo de anillos alrededor del paciente, con diámetros adecuados para cubrir el mayor ángulo sólido posible (Figura 2).

Debido a su alta eficiencia de detección (típicamente del 2 al 10 % de los fotones emitidos son detectados en PET), los estudios PET pueden formar imágenes de regiones que hayan captado una cantidad diminuta del radiofármaco, lo que le ha dado al PET la importancia que tiene hoy en día en la detección temprana de distintas patologías. Sin embargo, la PET es más utilizada como una herramienta cualitativa cuando también puede usarse como una herramienta que provee, en muchos casos, información de carácter cuantitativo. La cuantificación en PET consiste en la determinación de la cantidad de actividad captada por las diferentes regiones de interés médico. Esta cuantificación se ve afectada por diversos factores que dependen tanto del paciente como de los procesos físicos y técnicos del equipo para detectar y formar las imágenes tomográficas.

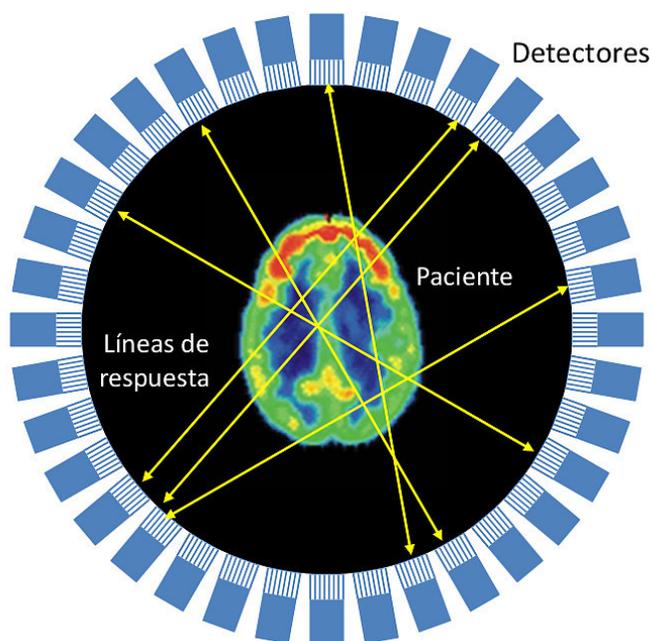


Figura 2: La imagen al centro muestra la distribución de radiofármaco en un corte del cerebro de un paciente (los colores significan diferentes concentraciones del radiofármaco) y las líneas de respuesta (en amarillo) representan la detección en coincidencia de los fotones de aniquilación de 511 keV. En un estudio PET es necesario registrar millones de líneas de respuesta utilizando arreglos de detectores colocados alrededor del paciente en forma de anillo. [Ver en alta resolución.](#)

Para producir una imagen en PET cuyos valores de voxel representen la actividad de sustancia radiactiva concentrada en ese volumen, es necesario aplicar diferentes correcciones a los datos adquiridos durante el estudio, antes de ser utilizados para reconstruir las imágenes tomográficas. Las correcciones son necesarias y pueden ser extremadamente complejas; toman en cuenta factores como el decaimiento de la sustancia radiactiva a lo largo del tiempo, la no uniformidad en la respuesta de los detectores, por la atenuación y dispersión de los fotones de aniquilación dentro del paciente, por el registro de eventos en coincidencia aleatorios y por el tiempo muerto de los detectores.

Las imágenes tomográficas en PET se obtienen utilizando millones de líneas de respuesta (entre 10^6 y 10^7) registradas por el escáner y algoritmos matemáticos como la retroproyección filtrada, métodos algebraicos, de Fou-

rier o iterativos. De todos estos algoritmos, la retroproyección filtrada fue la más utilizada en la clínica hasta hace pocos años debido a su facilidad y rapidez de implementación. Sin embargo, este método presenta la desventaja de proveer información semi-cuantitativa, limitando el potencial de los estudios PET. Los métodos de reconstrucción iterativa son, por otro lado, los más precisos pues permiten incorporar la estadística de emisión y detección de los fotones de aniquilación, las variaciones en la respuesta de los detectores debido a aspectos geométricos y de eficiencia de detección, así como la incorporación de otro tipo de correcciones como las que se acaban de mencionar. Los métodos iterativos requieren del uso de computadoras de gran poder de cálculo y almacenamiento para generar y guardar imágenes de alta calidad que permitan realizar diagnósticos precisos y análisis cuantitativos. Actualmente es cada vez más común que los escáneres comerciales incluyan métodos iterativos de reconstrucción tomográfica.

DETECTORES PARA PET

El material utilizado como detector en PET es el factor clave que determina la sensibilidad, resolución espacial y capacidad de conteo del sistema. Los requisitos deseables más importantes para los detectores de fotones de 511 keV incluyen: que tengan una densidad alta y número atómico efectivo grande para así aumentar la eficiencia intrínseca de detección, que sean rápidos para poder establecer ventanas temporales pequeñas y sea posible adquirir datos a altas tasas de conteo. Adicionalmente es importante que provean una resolución espacial adecuada y buena resolución en energía. Dado que se requieren cientos de detectores para construir un escáner PET, un requisito importante a considerar es que sean baratos. Tradicionalmente, y desde que se propuso esta técnica de diagnóstico, la mayoría de los detectores en escáneres PET comerciales se basan en módulos formados por cristales centelladores acoplados a tubos fotomultiplicadores (PMT) convencionales. El principio de funcionamiento de este detector es transformar la energía de los fotones de 511 keV en luz (función principal del centellador) la cual es posteriormente convertida a una señal eléctrica por el tubo fotomultiplicador. Estas señales son procesadas, digitalizadas y corregidas antes de ser utilizadas para reconstruir las imágenes tomográficas.

Hasta principios de 1970 un centellador ampliamente utilizado para la detección de rayos gamma en aplicaciones de medicina nuclear era el yoduro de sodio dopado con talio, NaI(Tl). Sin embargo, este centellador tiene varias desventajas para ser utilizado en la detección de fotones de 511 keV:

tiene densidad y número atómico efectivo bajo, además de que es frágil, difícil de producir y de usar pues es higroscópico (ver Tabla 4). Alrededor de 1975 se propuso al germanato de bismuto (BGO) como un centellador adecuado para su uso en escáneres PET pues su número atómico y densidad son más altos, a pesar de ser poco luminoso y lento, comparado con el NaI(Tl). El BGO fue el centellador que se utilizó por más de 30 años para la construcción de escáneres PET pues proporcionaba un balance adecuado entre eficiencia de detección, resolución espacial y costo. En la década de los 1990 apareció en el mercado el oxioortosilicato de lutecio (LSO), un centellador sumamente atractivo por ser muy luminoso (por un factor de 5) y rápido (por un factor de 7.5) con respecto al BGO, particularmente útil para estudios con altas tasas de conteo. Aunque, por otro lado, tiene el ligero inconveniente de ser menos eficiente para la detección de fotones de 511 keV. Hoy en día persiste el interés de desarrollar nuevos centelladores para PET aún más rápidos, luminosos y eficientes. Un buen candidato es el bromuro de lantano (LaBr₃) el cual, como lo indica la Tabla 4, cumple con estos requisitos. Sin embargo, tiene la desventaja de que es caro, higroscópico y difícil de crecer en tamaños y formas adecuados, por lo que su uso se ha restringido para investigación básica.

	NaI(Tl)	BGO	LSO	LaBr ₃
Número atómico efectivo	50	74	66	47
Coefficiente lineal de atenuación @ 511 keV (cm ⁻¹)	0.34	0.92	0.87	0.47
Densidad (g cm ⁻³)	3.67	7.13	7.4	5.3
Producción de luz (%)	100	15	75	160
Longitud de onda pico (nm)	410	480	420	370
Constante de decaimiento (ns)	230	300	40	25
Higroscópico	Si	No	No	Si

Tabla 4: Características más importantes de centelladores utilizados para PET. La producción de luz es con respecto al NaI(Tl).

Durante más de 3 décadas se utilizó el concepto de “detector de bloque” en PET para obtener las posiciones (x,y) de los eventos registrados en coincidencia. El principio de funcionamiento del detector de bloque se basa en el control de la distribución de luz proveniente de los cristales centelladores. Este principio se muestra en la figura 3 en donde 4 tubos fotomultiplicadores convencionales se acoplan ópticamente a un conjunto de cristales centelladores segmentados parcialmente (es decir, a diferentes profundida-

des) formando un determinado patrón. Las fronteras entre los cristales se llenan con un material reflejante para controlar y reducir el cruce de fotones ópticos entre los cristales individuales. Lo que se consigue con este diseño es que la luz se distribuye de manera diferente en los fotomultiplicadores, lo cual permite determinar la posición de interacción de los fotones de aniquilación. Las señales de salida de los fotomultiplicadores son utilizadas para determinar en qué segmento de cristal ocurrió la interacción. Esta ingeniosa técnica prevaleció en los escáneres PET hasta hace algunos años, cuando aparecieron en el mercado los tubos fotomultiplicadores sensibles a la posición.

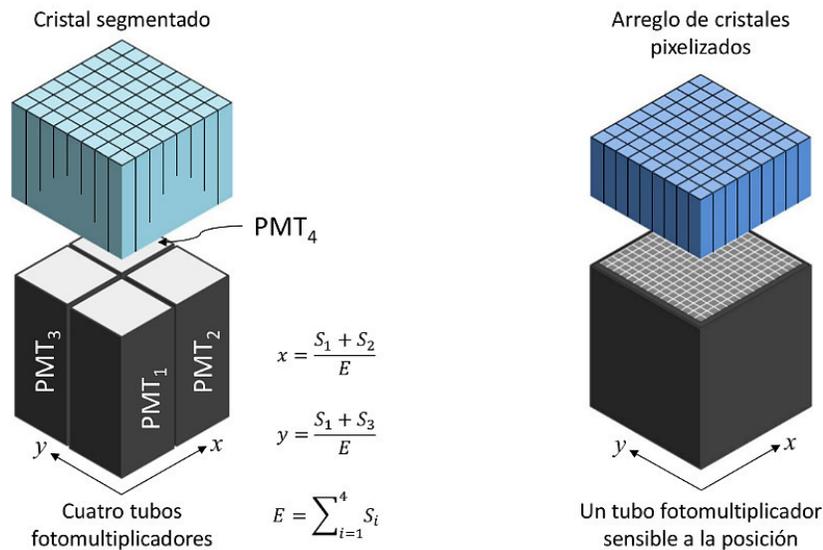


Figura 3: Con un detector de bloque (izquierda) la posición de interacción de un fotón de 511 keV se determina como función de la luz compartida entre los 4 fotomultiplicadores y la señal que generan (S_i). Los detectores modernos (derecha) utilizan fotosensores sensibles a la posición. [Ver en alta resolución.](#)

Actualmente los módulos de detección más modernos para PET están contruidos de arreglos pixelizados de cristales centelladores muy rápidos y luminosos acoplados a tubos fotomultiplicadores sensibles a la posición (ver figura 3, derecha) o fotodiodos de avalancha. Los fotodiodos de avalancha (APD) son fotodetectores de silicio que están comenzando a reemplazar a los PMTs en los módulos de detección PET. Al igual que los tubos fotomultiplicadores, estos dispositivos detectan la luz generada por el cristal centellador. Esta luz genera ionizaciones en el semiconductor y un campo

eléctrico intenso libera más electrones amplificando la señal. En un detector de estado sólido moderno de medicina nuclear se tienen de cientos a miles por mm^2 de APDs (microceldas) en un arreglo cuadrulado, para formar lo que se conoce como un fotomultiplicador de silicio (SiPM) el cual puede alcanzar factores de ganancia entre 10^5 a 10^7 , similar a los PMTs. Cada microcelda es capaz de recibir la luz de un fotón de centelleo a la vez, por lo que la linealidad de la respuesta en energía de un SiPM depende del número de microceldas que lo conformen. Estos detectores presentan varias ventajas sobre los PMTs: se requieren decenas de volts para su operación, son más compactos, tienen un desempeño muy uniforme por lo que se pueden hacer arreglos de área grande, son rápidos (importante para utilizar la información del tiempo de vuelo) y son insensibles a campos magnéticos, lo que permite el desarrollo de escáneres híbridos que combinen PET con resonancia magnética.

La electrónica de adquisición también debe ser muy compleja y rápida para poder establecer ventanas temporales de varios ns, discriminar eventos en función de su energía, eliminar pulsos no deseados y convertir las señales analógicas a digitales. También es necesario transferir los datos a una computadora para su análisis, procesamiento y almacenamiento, así como para la reconstrucción de las imágenes tomográficas. Este proceso es aún más complicado cuando la adquisición de datos ocurre en 3 dimensiones, lo cual es deseable para lograr registrar el mayor número posible de líneas de respuesta, y por lo tanto, mejorar la estadística y calidad de las imágenes.

La tecnología utilizada en los escáneres PET ha mejorado drásticamente desde su propuesta de uso en la clínica a mediados de los 1970. Hoy en día un escáner PET de última generación, como el Siemens Biograph Vision, está formado de un gran número de módulos de detectores basados en cristales centelladores LSO (60,800 elementos individuales de $3.2 \times 3.2 \times 20$ mm) acoplados a más de 38,000 fotomultiplicadores de silicio (SiPM) de última generación. Los módulos se posicionan a lo largo de anillos múltiples para cubrir un campo de vista axial de 26 cm y con una camilla de posicionamiento motorizada para ingresar al paciente al túnel del escáner de 78 cm de diámetro. El desempeño del escáner es de excelencia; permite el uso de ventanas temporales de coincidencia de ~ 4 ns, mientras que la resolución en energía puede ser menor al 9%. La resolución espacial transaxial que puede alcanzar es menor a los 4 mm, la mejor que puede ofrecer un escáner clínico gracias a la resolución temporal de los detectores de tan solo 214 ps, al tamaño tan pequeño de los cristales y a la técnica de tiempo de vue-

lo (TOF) con el que son registrados los fotones de aniquilación. La técnica TOF permite, además de localizar el punto de aniquilación del positrón con mayor exactitud, mejorar el contraste, la sensibilidad y el cociente señal a ruido de las imágenes.

La determinación precisa de la concentración de actividad en una región se ve afectada por diversos procesos físicos. De particular importancia es la atenuación de los fotones de aniquilación en el paciente, especialmente para sujetos voluminosos. La atenuación se refiere a la disminución del número de fotones detectados en el escáner debido a que una fracción de ellos no escapa del paciente. Esta pérdida de fotones es causada por sus interacciones con los diversos tejidos a través del efecto fotoeléctrico o por dispersión Compton. Existen métodos para corregir por el efecto de la atenuación en PET. El más usado actualmente consiste en realizar un estudio de tomografía computarizada (CT) al paciente. Las imágenes de CT están directamente relacionadas con mapas anatómicos que representan los coeficientes lineales de atenuación de los distintos tejidos. Esta información se emplea para obtener los factores de corrección para compensar por la pérdida de fotones de 511 keV en el estudio PET. Esto es posible ya que el factor de corrección por atenuación en PET es independiente del punto de aniquilación del positrón y solamente depende de la suma de los coeficientes lineales de atenuación a lo largo de cada línea de respuesta. De esta manera, los equipos actuales generalmente son híbridos (PET/CT) pues tienen ambas modalidades de imagen, lo que permite no sólo realizar la corrección por atenuación, sino también una fusión de imágenes para combinar la información funcional de la PET y la anatómica del CT en un mismo estudio.

EJEMPLO DE ESTUDIOS PET CON DIFERENTES RADIOFÁRMACOS

Para hacer evidente la importancia del uso de diferentes radiofármacos para seguir rutas fisiológicas específicas, en la Figura 4 se muestran estudios PET de individuos sanos a los que se les administró [^{18}F]Fluorodeoxiglucosa, [^{18}F]Fluorotimidina [^{18}F]Fluoruro de sodio y [^{11}C]Acetato (de izquierda a derecha en la figura) para estudiar metabolismo de la glucosa, proliferación celular, lesiones óseas y metabolismo β oxidativo, respectivamente. Los colores en las imágenes muestran diferentes concentraciones de actividad; el azul representa menor concentración, mientras que rojo representa mayor concentración. Las flechas indican las regiones de interés para lo cual fueron diseñados y en donde una captación del radiofármaco por encima o debajo de un cierto nivel puede ser indicativo de una anomalía en el

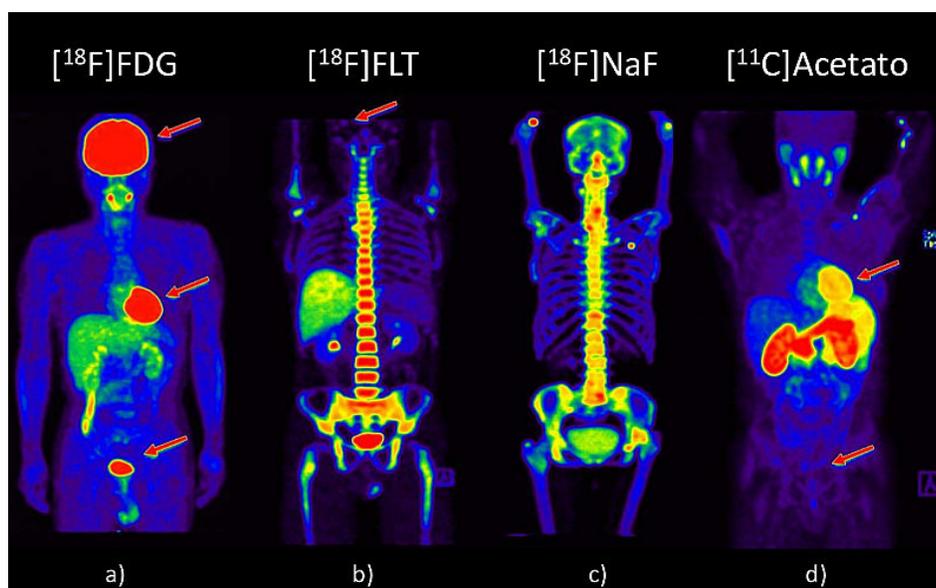


Figura 4: Imágenes PET de individuos sanos para estudiar: a) metabolismo de la glucosa, b) proliferación celular, c) lesiones óseas y d) metabolismo β oxidativo. Fuente: Dr. M. A. Ávila Rodríguez, Unidad Radiofarmacia-Ciclotrón, Facultad de Medicina, UNAM. [Ver en alta resolución.](#)

órgano o tejido de interés.

Las áreas de investigación que están siendo desarrolladas actualmente en PET tienen como objetivo mejorar el desempeño de los equipos con base en su sensibilidad, contraste y resolución espacial. Para lograr esto se están proponiendo nuevas configuraciones de detectores que permitan obtener información sobre la profundidad de interacción, geometrías novedosas y tamaños menores de cristales centelladores, así como técnicas de tiempo de vuelo (TOF-PET) usando detectores con resoluciones temporales de algunos cientos de picosegundos.

Hoy en día la formación de imágenes en PET ya no se limita a aplicaciones en diagnóstico, sino que se ha convertido en un elemento esencial en programas de escrutinio para la detección temprana de enfermedades, en la estadificación de enfermedades neoplásicas, en planificaciones de tratamientos en radioterapia y en su seguimiento en el cuidado oncológico. En un futuro no muy lejano también permitirán obtener información sobre la respuesta biológica de tejidos irradiados durante tratamientos personalizados en radioterapia.

EQUIPOS DE MAMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES

Recientemente se han desarrollado equipos dedicados a obtener imágenes por emisión de positrones del tejido mamario. Existen esencialmente dos versiones de estos equipos: los Mamógrafos por Emisión de Positrones (PEM) y los PET para mama. Los primeros consisten esencialmente de dos paneles de detectores planos y opuestos funcionando en coincidencia. De la misma manera que en una mamografía con rayos X, se realiza una compresión ligera de la mama mientras se adquieren los datos para formar la imagen a partir de la detección simultánea de los fotones de aniquilación de una paciente inyectada previamente con un radiofármaco. Estos equipos obtienen imágenes con una alta sensibilidad ya que se optimiza la cobertura de ángulo sólido, con una resolución espacial de aproximadamente 2.4 mm, superior a las imágenes de PET de cuerpo completo. La segunda clase de equipos consisten de un conjunto de detectores posicionados alrededor de la mama cuando la paciente se encuentra recostada en posición decúbito ventral sobre una mesa con una abertura circular. Al adquirir proyecciones a distintos ángulos se pueden utilizar los datos para obtener imágenes tomográficas y con la ventaja adicional de que no se requiere realizar una compresión de la mama. En este caso, se han reportado reconstrucciones con resolución espacial en el plano transaxial que oscila entre 1.6 mm y 2.7 mm. La valoración y uso de estos equipos va en aumento, pues pueden confirmar o descartar de manera no invasiva la presencia y/o malignidad de algunos tumores sin la necesidad de una biopsia, lo que sin duda será una herramienta poderosa para el diagnóstico temprano del cáncer de mama.

EQUIPOS MULTIMODALES

La tomografía por emisión de positrones es una modalidad de imagenología médica que no sustituye a las ya existentes de tomografía computarizada o de resonancia magnética. Por el contrario, la combinación de estudios de diferentes modalidades, que proporcionan información de diferentes propiedades de los tejidos (anatómicos, fisiológicos o metabólicos), tiene el potencial de proporcionar información complementaria para aumentar la sensibilidad y especificidad de los diagnósticos realizados. Una tendencia actual tiene como objetivo fusionar información generada con dos o más técnicas de imagenología proveniente de un mismo equipo, como por ejemplo PET/CT o PET/MRI. Los sistemas multimodales son ahora una realidad, como se muestra en la Figura 5. La combinación de cualquier

modalidad de imagen con resonancia magnética es particularmente difícil pues es necesario el uso de detectores insensibles a campos magnéticos, lo cual hoy en día es posible gracias al desarrollo de instrumentación científica muy sofisticada que incluye detectores de estado sólido. También se están haciendo esfuerzos para desarrollar técnicas innovadoras para sistemas preclínicos como la imagenología óptica (fluorescencia, bioluminiscencia o Cerenkov), micro-ultrasonido de alta frecuencia, tomografía fotoacústica, etcétera, que tendrán un impacto relevante en la evolución y mejoramiento de sistemas de imagenología clínicos.

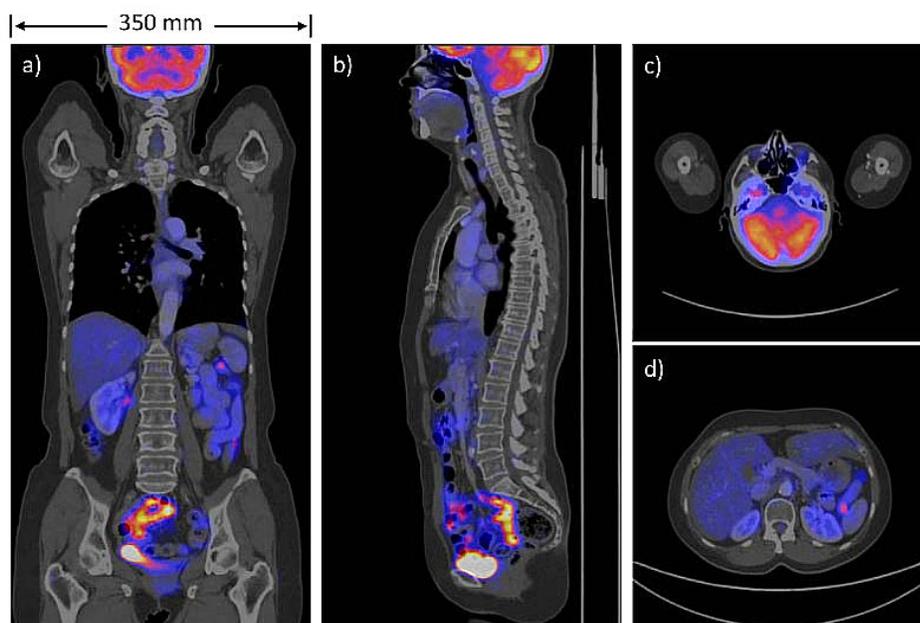


Figura 5: Fusión de imágenes de tomografía por emisión de positrones y tomografía computarizada. El estudio PET se realizó con un tomógrafo PET/CT Siemens Biograph de 16 cortes para estudiar metabolismo de la glucosa con $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$. Se muestra la distribución normal en un adulto sano a lo largo de diferentes cortes: coronal (a), sagital (b) y axiales al nivel de las fosas nasales y de los riñones (c y d, respectivamente). [Ver en alta resolución.](#)

TOMOGRFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES PARA ANIMALES PEQUEÑOS

Los equipos diseñados para realizar estudios de animales de laboratorio, generalmente roedores, son aparentemente copias en miniatura de los

escáneres utilizados para los estudios de pacientes. Sin embargo, aunque el reto de proporcionar imágenes de alta calidad administrando la menor cantidad de un radiofármaco es el mismo, la diferencia en tamaños entre una persona y un roedor propone desafíos adicionales que se ven reflejados en los diseños de los equipos que van más allá del simple cambio de escala.

La disminución del diámetro de los anillos de detectores (de 80 cm a 15 cm) no es solamente para ahorrar costos. El colocar los detectores en un arreglo lo más cercano posible al sujeto de estudio aumenta la eficiencia geométrica (ángulo sólido) de detección de los fotones de aniquilación. Esto es particularmente importante debido al volumen de radiofármaco mucho menor que se puede inyectar a los roedores, lo que a su vez limita la cantidad de material radiactivo que se les puede administrar para los estudios. Mientras que a una persona de 70 kg, con un volumen aproximado de 5 litros de sangre, el estudio PET se puede realizar utilizando algunos mililitros de un radiofármaco, en el caso de una rata de 200 a 300 g solamente es posible inyectar un volumen máximo de alrededor de 1 ml y a un ratón de 30 g un volumen no mayor a 0.1 ml (Tabla 5). La disminución del diámetro de los anillos del escáner permite además incluir más detectores en la dirección axial, de tal suerte que el número de detectores de un microPET es similar al de un equipo para pacientes.

	Humano	Rata	Ratón
Peso	70 kg	200-350 g	20-30 g
Volumen sangre	5.0 l	13 -22 ml	2.0-2.6 ml
Volumen inyectable (ml)	~3.0	<2.0 [†]	<0.5 [†]
Actividad inyectable (mCi) [‡]	10	0.30-0.50	0.15 -0.35
Dosis (mGy)	6.7	10 -270 [*]	60-1000 [*]

[†]Volumen inyectable por vía intravenosa a roedores.

[‡]Actividad típica de [¹⁸F]FDG que se administra para un estudio de cuerpo completo.

^{*}Estimaciones de dosis para roedores.

Tabla 5: Características relevantes que deben considerarse para la realización de estudios PET en personas y roedores.

La eficiencia de detección requerida para contrarrestar la baja cantidad de material radiactivo que se le puede administrar a un roedor ha llevado a los científicos a encontrar y utilizar materiales centelladores de densidad y número atómico alto y que simultáneamente sean rápidos y de gran lu-

miniosidad. Algunos de estos materiales, como el LSO, explorados ampliamente en sistemas micro también han permitido que en algunos equipos se empiece a incorporar la información de tiempo de vuelo para aumentar la sensibilidad y mejorar la calidad de los estudios.

Además del requerimiento de aumentar la eficiencia de detección, se tiene la exigencia natural de los equipos para proveer imágenes con buena resolución espacial. Como ya se mencionó, los escáneres clínicos tienen actualmente una resolución espacial alrededor de 4 mm. En el caso de los equipos para animales, los escáneres comerciales más modernos tienen una resolución espacial alrededor de 1 mm. En la tabla 6 se muestran algunas características importantes que ayudan a entender la complejidad que representa realizar estudios cerebrales PET a ratas y ratones de laboratorio en comparación con una persona. Esta capacidad de poder distinguir las estructuras más pequeñas de los animales de laboratorio se consigue utilizando detectores con cristales centelladores de dimensiones menores. A su vez, el tamaño tan reducido de los cristales requiere implementar métodos más complicados para la determinación de la detección de los fotones de aniquilación debido a un error de paralaje. Esta situación se está solucionando con la introducción de métodos para determinar la profundidad de interacción de los fotones de 511 keV en los centelladores.

	Humano	Rata	Ratón
Volumen del cerebro (cm ³)	1300	1.75	0.5
Dimensiones lineales del cerebro [†] (cm)	11.0	1.2	0.8
Resolución espacial (mm)	5	0.6	0.4

[†]Las dimensiones lineales de los cerebros se calculan como la raíz cúbica de su volumen.

Tabla 6: Resolución espacial requerida para estudios PET cerebrales de humanos, ratas y ratones (Larobina *et al*, Current Medical Imaging Reviews 2, 2006, 187-191.)

Una ventaja que se tiene al realizar estudios de animales pequeños es que la atenuación de los fotones de aniquilación en el sujeto es mucho menor que en el caso de pacientes. Como se mencionó, para realizar la corrección por atenuación, los equipos clínicos modernos utilizan el mapa de los coeficientes lineales de atenuación que se obtiene por medio de un estudio de CT. En el caso de los microPET, se puede prescindir de la corrección por atenuación si es que solamente se requieren imágenes de carácter cualitativo. Si se desea una cuantificación precisa, la corrección por atenuación se realiza de la misma manera que en caso clínico si se dispone de un equi-

po híbrido o bien por medio de una fuente radiactiva que gira en torno al sujeto para obtener los factores de corrección por medio de un estudio de transmisión.

La demanda de los equipos PET para animales pequeños ha ido en aumento conforme los investigadores en ciencias de la salud se han dado cuenta de las aportaciones que pueden dar a sus trabajos de investigación. Estos equipos permiten ahorrar el número de animales sacrificados y al mismo tiempo, cada sujeto funge como su propio control. Las aplicaciones de los equipos PET para animales se pueden resumir en:

1. Investigación preclínica. El 80 % de los equipos PET preclínicos en Estados Unidos se utilizan para realizar investigación utilizando modelos animales para el estudio y seguimiento de enfermedades y tratamientos. La mayor parte de estas investigaciones son de origen oncológico enfocadas en estudiar procesos de oncogénesis, angiogénesis, proliferación celular, hipoxia, necrosis y apoptosis en tumores y los efectos que tienen las diversas terapias en desarrollo sobre estos tejidos.
2. Desarrollo de radiofármacos nuevos. Antes de su aprobación para uso clínico, los radiofármacos deben pasar por un conjunto de pruebas rigurosas para garantizar, por ejemplo, su alta especificidad para acoplarse a los receptores a los que están dirigidos, que siguen la ruta metabólica para la que fueron diseñados, que no tienen efectos adversos indeseados, para estudiar los tiempos óptimos de biodistribución y farmacocinética, para establecer los parámetros de adquisición, entre otros.
3. El desarrollo mismo de los equipos para animales contribuye a la investigación de mejores tecnologías en el ámbito clínico. Por ejemplo, la tecnología e instrumentación desarrolladas para estos equipos se ha trasladado a los escáneres para humanos. Algunos de los algoritmos de reconstrucción optimizados para mejorar la calidad de imagen en escáneres microPET se han extrapolado a los tomógrafos clínicos.

En los estudios microPET es necesario contar con un sistema de anestesia para mantener a los animales inmóviles durante la adquisición de datos. Al igual que en una fotografía convencional, si el sujeto se mueve, la imagen sale borrosa. Usualmente se mantiene a los animales anestesiados utilizando isofluorano inhalado colocándoles una mascarilla. Aunque este tipo de

anestesia no interfiere con la mayoría de procesos metabólicos que se están investigando, en el caso de algunos estudios neurológicos, el estado de un ratón bajo anestesia pudiera afectar la biodistribución de los radiofármacos en el cerebro. Para esto, algunos grupos de investigación han propuesto prototipos que se ajustan al cráneo del roedor y el estudio se puede realizar mientras ellos se mueven libremente y sin la necesidad de usar anestesia. De cualquier manera, se requieren introducir correcciones en las imágenes para tomar en cuenta el movimiento por el ciclo respiratorio y cardiaco.

Otro aspecto técnico a considerar consiste en mantener la temperatura constante de los animales bajo estudio. Los tomógrafos por emisión de positrones requieren trabajar bajo ambientes de temperatura controlada alrededor de los 20°C por un lado, para evitar el sobrecalentamiento de sus componentes electrónicos y, por otro, ya que la respuesta de sus detectores tiene variaciones que se ven afectadas por el calor. Bajo las condiciones de estudio, los animales pequeños pueden sufrir de hipotermia, en particular, si se encuentran anestesiados. Es por esto que algunos equipos cuentan con mesas o cámaras de temperatura ajustable, o bien, se puede utilizar un foco incandescente como calentador.

INSTRUMENTACIÓN PARA MICROPET EN LA UNAM

El Instituto de Física de la UNAM ha venido desarrollando en los últimos años instrumentación para prototipos microPET. Los módulos de detección se basan en arreglos de cristales centelladores pixelizados acoplados a tubos fotomultiplicadores sensibles a la posición (PS-PMT). Los cristales centelladores son de oxiortosilicato de lutecio dopados con itrio (LYSO); cada cristal individual está separado de sus vecinos por el material reflector VM2000 de 75 μm de espesor. Los tubos fotomultiplicadores sensibles a la posición tienen 8 \times 8 ánodos, produciendo 64 salidas que pueden ser digitalizadas individualmente, además de una señal de disparo. Debido al alto costo que involucra digitalizar tal cantidad de señales, se utilizan circuitos electrónicos (cadenas resistivas) para reducir las 64 salidas a tan sólo 4.

Actualmente se cuenta con dos prototipos con diferentes resoluciones espaciales determinadas, principalmente, por el tamaño del cristal. Las características técnicas de los componentes de ambos prototipos se muestran en la Tabla 7 y en las figuras 6 y 7. En ambos sistemas, el sujeto bajo estudio se coloca verticalmente sobre una plataforma giratoria al centro de los detectores, con la adquisición de datos automatizada y sincronizada con el movimiento de la plataforma.

	LR (Low Resolution)	HR (High Resolution)
No. de detectores	4	Hasta 8
Cristales LYSO	20×20 (2×2×10 mm ³)	16×16 (1×1×10 mm ³)
PS-PMT	Hamamatsu H8500	Hamamatsu H7546B
Señales de salida	64	64
No. de ánodos	8×8 (5.8×5.8 mm ²)	8×8 (2×2 mm ²)
Área sensible	49×49 mm ²	18×18 mm ²
Distancia entre detectores	10.2 cm	10.5 cm

Tabla 7: Características técnicas de los prototipos microPET del IFUNAM.

En el prototipo LR (Figura 6) las 4 señales de salida de la cadena resistiva y la señal de disparo de cada PS-PMT son procesadas con electrónica nuclear NIM para eliminar pulsos no deseados (ruido y apilamiento) y darle forma a los pulsos para su digitalización con una tarjeta de adquisición de datos multicanal de 14 bits de profundidad. La ventana de coincidencia es de 12 ns y la ventana en energía de 370 a 660 keV. Los datos se procesan para obtener la posición y energía (x, y, E) de los eventos en coincidencia, los cuales se corrigen por decaimiento, respuesta no uniforme de los detectores y distorsión geométrica. Las imágenes tomográficas se reconstruyen utilizando retroproyección filtrada.

Estudios del desempeño del prototipo LR indican que la resolución espacial se encuentra entre 1.5 y 2 mm, que la resolución en energía de cristales individuales varía del 7 al 15%, y que su sensibilidad es menor al 0.5% (lo que implica tiempos largos de adquisición, de hasta 1.3 h). Se han realizado estudios óseos con [¹⁸F]NaF y de metabolismo del azúcar con [¹⁸F]FDG a ratones eutanizados, obteniendo imágenes tomográficas (Figuras 6c y 6d) con suficiente resolución espacial para visualizar diferentes estructuras. También se han desarrollado protocolos para la fusión de imágenes anatómicas y fisiológicas microCT/microPET tanto de maniqués de prueba como de ratones de laboratorio.

Dada la complejidad y alto costo de la electrónica NIM para la inclusión de un mayor número de detectores en el prototipo HR, se sustituyó el sistema de adquisición de datos considerando:

- a) Cadenas resistivas que reducen el número de señales de 64 a 4 acopladas a circuitos electrónicos que incluyen una etapa de amplificación e inversión de señales utilizando amplificadores operacionales de alta velocidad y desempeño.

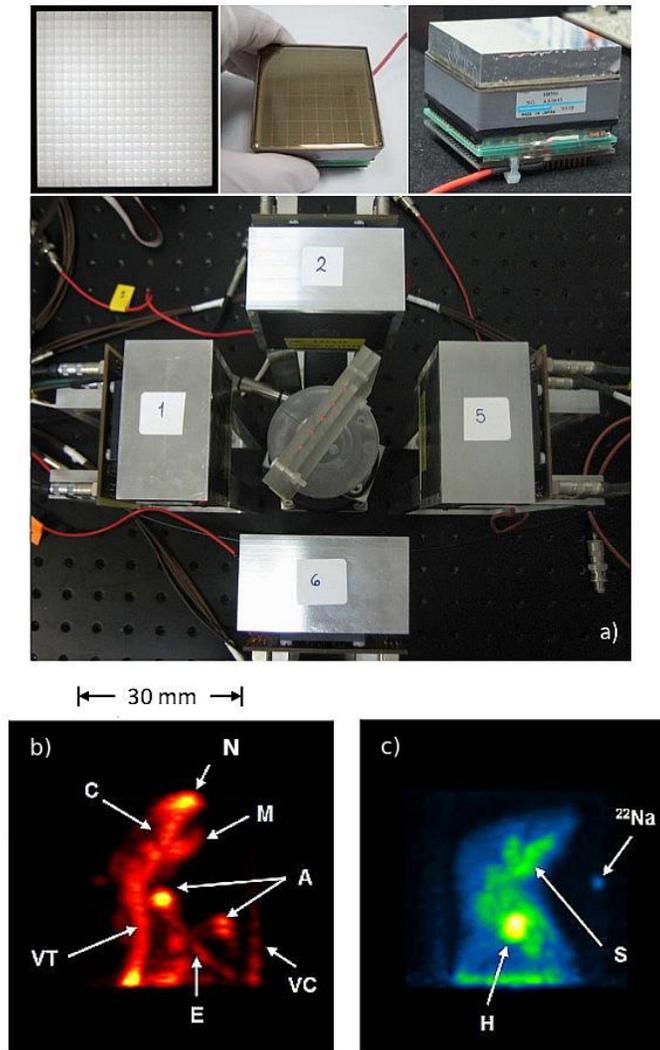


Figura 6: Prototipo microPET LR: a) Componentes individuales del módulo de detección (arreglo pixelizado de cristales LYSO, PS-PMT Hamamatsu H8500, ensamble) y vista superior de los 4 módulos de detección con la plataforma giratoria al centro. b) y c) Proyecciones de máxima intensidad de estudios microPET óseo y metabólico con $^{18}\text{F}[\text{NaF}]$ y $^{18}\text{F}[\text{FDG}]$, respectivamente, de ratones sanos. La identificación de las diferentes estructuras se puede consultar en Alva-Sánchez *et al*, Rev. Mex. Fis. 56-2 (2010) 175. Notar la diferencia de escala con respecto a la Figura 5. [Ver en alta resolución.](#)

- b) Tarjetas multicanal basadas en FPGAs. Este sistema es muy versátil y compacto; incluye circuitos de amplificación, una unidad de disparo para 8 detectores, diferentes ventanas de coincidencia, digitalización de las señales con 12 bits y transferencia de datos a través de Ethernet.

De la misma manera que con el prototipo LR, los datos se procesan para obtener la posición y energía (x,y,E) de los eventos en coincidencia y se incluye una corrección adicional por centro de rotación. Adicionalmente, se desarrollaron e implementaron técnicas avanzadas de remuestreo y métodos iterativos de reconstrucción de imágenes tomográficas, lo que contribuyó a un mejor desempeño del sistema.

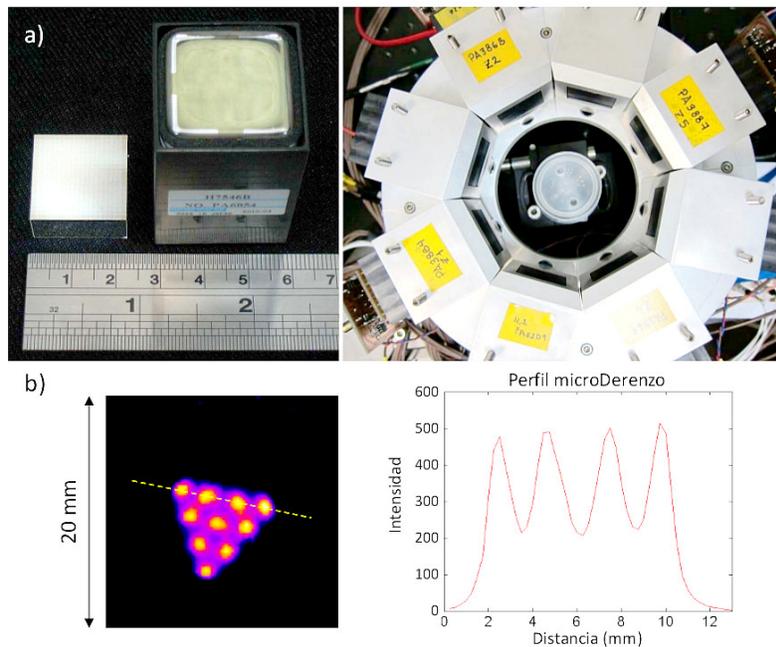


Figura 7: Prototipo microPET HR: a) Componentes individuales (cristales LYSO y PS-PMT Hamamatsu H7546B) y ensamble de 4 módulos de detección con la plataforma giratoria al centro. b) Reconstrucción tomográfica de una sección de un maniquí (microDerenzo) con ^{18}F para evaluar la resolución espacial del sistema; se muestran cilindros de 0.7 mm de diámetro separados 2.5 mm entre sí y un perfil a lo largo de la línea punteada. [Ver en alta resolución.](#)

Estudios del desempeño del prototipo HR indican que la resolución espacial es aproximadamente 0.9 mm y que su resolución en energía promedio de cristales individuales varía entre 22 al 30 % para los diferentes mó-

dulos de detección, resultados de alguna manera esperados debido al uso de cristales más pequeños. Por otro lado, su sensibilidad es 0.24 % con sólo 4 detectores. Comparado con el sistema LR, este prototipo presenta una mejora notable en la resolución espacial que puede alcanzar, una resolución en energía menor (aspecto que no es tan relevante debido a que los fotones dispersados no representan un problema real en estudios de roedores) y una mayor sensibilidad debido al uso de un mayor número de líneas de respuesta al incorporar métodos de remuestreo sofisticados.

UNA ÚLTIMA REFLEXIÓN

La tomografía por emisión de positrones es un ejemplo exitoso de la traslación de conceptos de física pura, de desarrollo de instrumentación, ingeniería y cómputo en tecnología para el beneficio de la sociedad. Las ventajas que brinda esta modalidad de imagen de diagnóstico tienen un impacto directo en las ciencias médicas y en la salud de los pacientes. El tener imágenes que reflejen el estado metabólico, con alta sensibilidad y especificidad, de una manera no invasiva y segura, hace de la PET una herramienta valiosa para el diagnóstico temprano y el seguimiento de muchas enfermedades. Es una técnica que sigue evolucionando y que, junto con las otras modalidades de imágenes médicas, está cambiando la manera de entender las complejidades del cuerpo humano y sus enfermedades.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Conacyt Atención a Problemas Nacionales 2015-01-612 y PAPIIT-UNAM IA103418.

BIBLIOGRAFÍA

Alva-Sánchez H., Rodríguez-Balderas C.A., Trejo-Ballado F., *et al.*. *Investigación preclínica por microPET en la UNAM*. Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM, 55-3, 4-10, 2012.

Ávila-Rodríguez M.A., Alva-Sánchez H. *Radiofármacos para PET, una nueva perspectiva de la medicina nuclear molecular en México*, El Residente, 5-3, 103-110, 2010

Cherry S.R., Sorenson J.A. y Phelps M.E. *Physics in Nuclear Medicine*, Saunders, 2012.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

ESPECTROSCOPIAS PARA EL ARTE Y LA ARQUEOLOGÍA: LOS FOTONES NOS CUENTAN LA HISTORIA

*José Luis Ruvalcaba Sil**

ANÁLISIS DE MATERIALES, ¿PARA QUÉ?

EN el estudio de los objetos históricos y del arte, ya sea un manuscrito, una pintura, una escultura o un artefacto, sea cual sea su naturaleza y su tipo, se considera principalmente el conocimiento de su contenido y sus contextos espacial y temporal. No obstante, la caracterización de su composición material ha sido considerada como un elemento de gran relevancia para su descripción y para su conocimiento más profundo. Cada vez es más usual emplear técnicas de análisis de los materiales en un estudio en arte, arqueología o historia, para obtener respuestas específicas a las interrogantes: ¿Qué materiales se usaron para realizar el objeto de estudio?, ¿Qué tecnologías se emplearon en su manufactura?, ¿Cuál es su función y propiedades?, ¿A qué temporalidad corresponde?, ¿Cuál es la procedencia del objeto y sus materiales?, ¿Es el objeto auténtico o ha sufrido cambios a lo largo de su historia?, ¿Cómo se relaciona este objeto con otros similares? Por otra parte, a partir de un estudio material es factible determinar el estado de deterioro y los métodos más adecuados para la conservación de colecciones y objetos únicos de nuestro patrimonio, de manera que el objeto conserve su significado y se preserve para las futuras generaciones (Figura 1).

La aplicación de técnicas analíticas para el estudio de los materiales propios del patrimonio cultural ha demostrado tener amplios alcances para contestar muchas de las preguntas que se plantean sobre cerámicas y vidrio, artefactos metálicos, manuscritos, lítica, pintura y pigmentos, y biomateriales, entre otros. Si bien existen limitaciones propias de las técnicas

* Departamento de Física Experimental, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

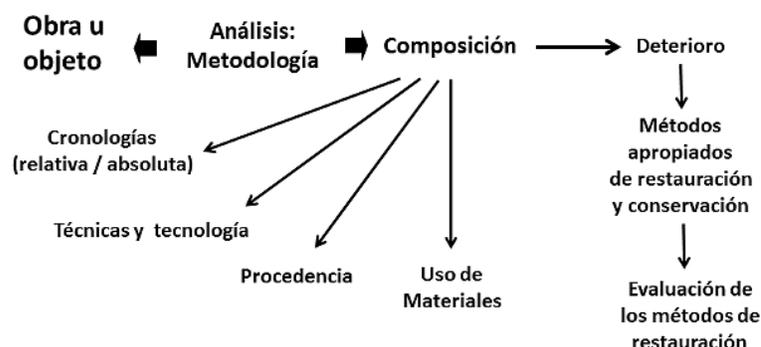


Figura 1: El análisis material de un objeto permite interpretar su composición en términos de sus componentes, procedencia, tecnologías, manufactura, y temporalidad; así como para entender su deterioro y proponer estrategias de conservación.

de análisis en cuanto a su aplicación y nivel de sensibilidad, los principales problemas que se afrontan en el estudio de los materiales de los objetos culturales conciernen a restricciones en el muestreo y acceso a las colecciones. Al ser objetos valiosos y únicos, en el mejor de los casos se puede tomar un número pequeño de muestras y en una cantidad mínima. Por lo tanto, lo ideal es aplicar un estudio no invasivo y no destructivo para su caracterización.

FOTONES Y ESPECTROSCOPIAS

La luz puede considerarse como un conjunto de fotones con una energía y longitud de onda características. La energía o la longitud de onda, determina el color de la luz ((Figura 2). En el espectro electromagnético, la luz visible ocupa un pequeño intervalo (400-700 nm). La luz roja (600-700 nm) tiene menor energía mientras que la luz azul (400-480 nm) tiene la mayor energía. La luz verde y la amarilla ocupan la región intermedia. La luz infrarroja (700-2000 nm) tiene menor energía que la luz visible y contrasta con la luz ultravioleta y los rayos X que tienen mucha mayor energía.

El uso de la luz para explorar la composición de los materiales se ha desarrollado desde hace tiempo. A partir de la irradiación de un objeto con luz, se producen como respuesta emisiones secundarias de otras radiaciones en función de la energía de excitación. Dichas emisiones contienen valiosa información que al descomponerse, permiten inferir los componentes atómicos y moleculares de los materiales. Si se emplean diversas fuentes de luz es factible, por lo tanto, caracterizar de una manera muy completa la

composición material de un objeto.

Los métodos que usan luz para excitar un material y que detectan y caracterizan las emisiones secundarias emitidas por el material se denominan espectroscopías. Existen espectroscopías de diversa naturaleza; se pueden clasificar según la luz o radiación de excitación según corresponda a los intervalos de luz visible, luz infrarroja y rayos X.

Espectro electromagnético

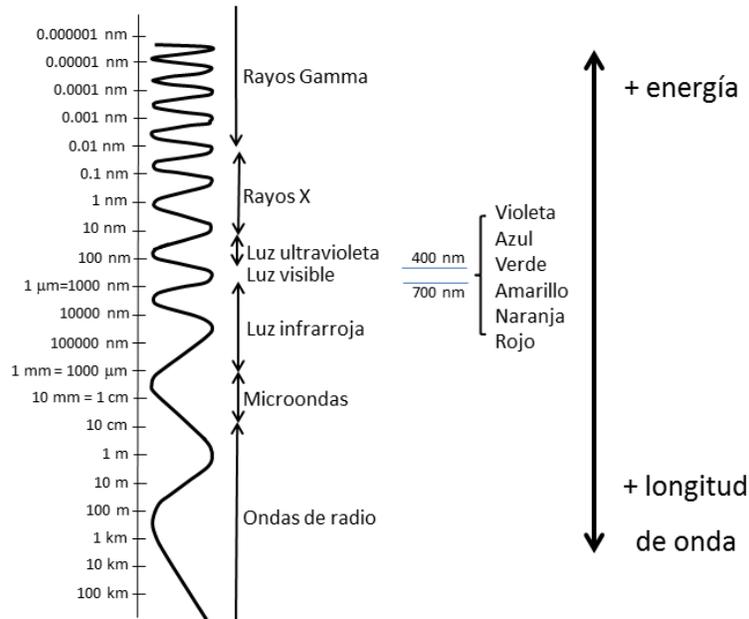


Figura 2: El espectro electromagnético en términos de su longitud de onda y energía.

Las técnicas basadas en el uso de luz visible e infrarroja (400 a 2000 nm), como la espectroscopía Raman e espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), proporcionan información vinculada a los enlaces químicos de las moléculas de los compuestos orgánicos e inorgánicos. Esto es así, porque la luz de dicho intervalo de longitud de onda tiene la energía suficiente para ser absorbida y hacer vibrar esos enlaces. Estas técnicas penetran poco en los materiales por lo que sólo proporcionan información de la superficie. Por ejemplo en el caso de una pintura, la luz visible e infrarroja permiten estudiar las capas pictóricas. En cambio, los rayos X que tienen mucho más energía, producen ionización en los átomos y dan lugar a la

emisión de rayos X característicos de los elementos químicos. La fluorescencia de rayos X (XRF) se basa en este fenómeno y es una de las técnicas de análisis elemental con alta sensibilidad más empleadas en el estudio material del patrimonio cultural.

Además, dependiendo de la energía de los rayos X de excitación y de los espesores y la composición de las capas pictóricas, con XRF se puede obtener información no sólo de las capas de pigmentos sino incluso de la base de preparación y el soporte de la pintura.

Por la energía de los rayos X, esta radiación es la más penetrante. Los rayos X son capaces de atravesar los objetos y al ser absorbidos de manera diferente por los materiales que los componen, es posible generar imágenes o radiografías que permiten entender su constitución interior.

DE OBJETOS A OBJETOS

Para un estudio material, la naturaleza del objeto es la que determina cuáles son las técnicas espectroscópicas más adecuadas, mientras que la complejidad del objeto determina además cuáles son las estrategias de análisis y de muestreo más apropiadas ((Figura 3).

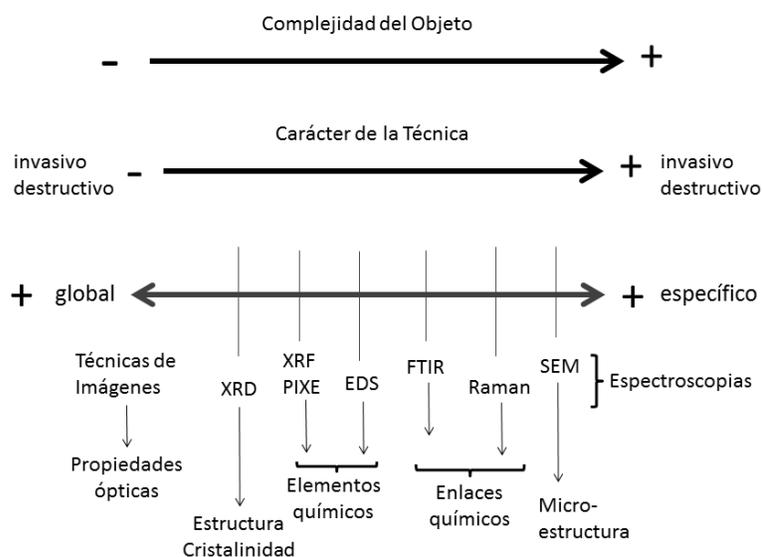


Figura 3: La complejidad de un objeto y su correlación con la aplicación de técnicas espectroscópicas.

Por ejemplo, un material lítico, que es uno de los objetos menos comple-

jos si no es muy heterogéneo, puede ser analizado directamente o mediante la toma de una muestra. Se requieren técnicas de caracterización para determinar los minerales que lo componen y técnicas de análisis elemental para poder establecer, a partir de la comparación con muestras de yacimientos, las posibles fuentes geológicas. Si es muy heterogéneo, se requieren análisis puntuales y el uso de técnicas micro analíticas, y probablemente de un muestreo más extenso.

En contraste, una pintura que es el objeto cultural más complejo, ya que está formado de una superposición de capas pictóricas de diversa naturaleza sobre un soporte, es más difícil de caracterizar ((Figura 4). Se requieren diversas radiaciones y técnicas para poder alcanzar diversas profundidades. El uso de técnicas de imágenes es indispensable para realizar la prospección del objeto en su superficie y en capas subyacentes, y es necesario utilizar análisis puntuales en regiones específicas. Es preciso llevar a cabo la evaluación de los procesos de repintes y restauración (que son muy usuales), y a partir de un análisis preliminar es factible definir las regiones de muestreo. Los fragmentos tomados de la pintura (se requieren unos cuantos en función del tamaño y tipo de la obra pictórica) se preparan para realizar observaciones con microscopía óptica y electrónica, y con técnicas químicas para determinar los componentes orgánicos. Al integrar toda la información se consigue la caracterización de este tipo de objetos y de su técnica de pictórica.

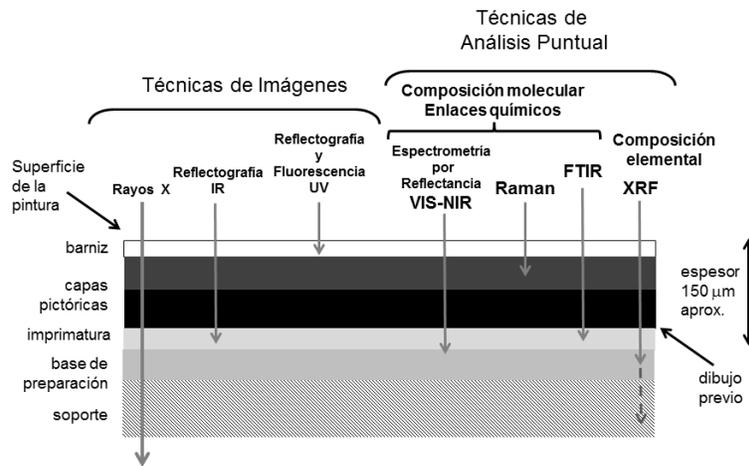


Figura 4: Relación de las técnicas espectroscópicas y de imágenes, información que proporcionan, y la profundidad de análisis para el caso de una pintura sobre tabla.

Los manuscritos también constituyen un reto para su estudio material, pues éstos no pueden en general ser muestreados. Tienen pequeñas cantidades de tintas en los trazos de escritura, a veces tienen pigmentos minerales y orgánicos, y son muy frágiles. En este caso las espectroscopías son técnicas únicas y poderosas para su estudio no invasivo.

Las técnicas de la Figura 4 están ordenadas de manera que se muestra el grado de información que proporcionan. Las técnicas de imágenes son los métodos globales para el examen general de una pieza. Los análisis espectroscópicos in situ permiten llevar a cabo un estudio de composición material en regiones específicas y para establecer una estrategia óptima de muestreo. Finalmente, el uso de técnicas de laboratorio sobre las muestras seleccionadas permite llevar a cabo un análisis más minucioso y específico.

Frecuentemente, se requiere el uso de diversas espectroscopías para estudiar un objeto, ya que como se mencionó, algunas proporcionan información molecular, otras proveen la composición elemental, y otras permiten conocer la estructura cristalina a partir de fenómenos como la difracción de rayos X. Por lo anterior, las espectroscopías de rayos X, rayos láser, luz infrarroja, luz visible son las más adecuadas para estos fines. Éstas se pueden aplicar en el laboratorio o in situ, directamente en el acervo sobre el objeto mediante el uso de equipos portátiles. Gracias a los adelantos tecnológicos, consecuencia de los avances en los vehículos espaciales, se han desarrollado pequeños espectrómetros y se ha optimizado su sensibilidad, su portabilidad, el tiempo de análisis y su aplicación a diversos materiales. Esto hace que su uso sea adecuado para el estudio de las colecciones del patrimonio cultural, así como para estudios geológicos y ambientales. Por ello, en los diversos laboratorios, en los museos y en los acervos más importantes del mundo, existen científicos dedicados a desentrañar los secretos que guardan los materiales de las colecciones y los artefactos de los sitios arqueológicos.

Por otro lado, para la interpretación de los resultados de los análisis se requieren con frecuencia bases de información sobre los materiales que faciliten su identificación. A diferencia de los materiales modernos, los materiales antiguos usados por las civilizaciones del pasado y los materiales naturales, contienen pequeñas cantidades de compuestos y elementos químicos que son trazadores de sus fuentes o de las técnicas de manufactura. Por ello, las bases de información son muy valiosas e indispensables para determinar la procedencia de materias primas y de rasgos tecnológicos. Su conformación es, por lo tanto, una de las tareas indispensables de todo grupo de investigación en este campo.

En el caso de México las bases de datos de los materiales están incompletas: en diversas áreas geográficas y para muchas temporalidades, existe poco conocimiento de las fuentes de las materias primas. Todo lo anterior hace del estudio analítico del patrimonio cultural tangible todo un reto en nuestro país.

NUEVAS METODOLOGÍAS Y NUEVAS TÉCNICAS

Dada la dificultad inherente para llevar a cabo un estudio eficaz de los materiales propios del patrimonio cultural, se requiere cada vez más de nuevas metodologías e innovaciones en las técnicas ya existentes. La mayoría de las técnicas de análisis están bien establecidas para el análisis de muestras en laboratorio. No obstante, la posibilidad de realizar un análisis no invasivo in situ se presenta como una forma idónea de estudiar los materiales culturales. Dentro de nuestro grupo de investigación se ha desarrollado una metodología que involucra el examen global y el uso de espectroscopías para el análisis in situ y en el laboratorio ((Figura 5).

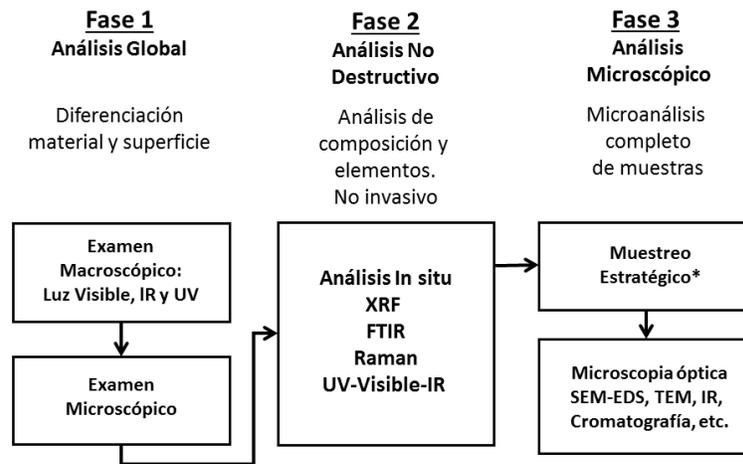


Figura 5: Metodología desarrollada para el estudio de objetos y colecciones del patrimonio cultural.

En la primera fase del estudio se aplican técnicas de fotografía científica con luz de diversas longitudes de onda (luz infrarroja, visible, ultravioleta). De esta manera se lleva a cabo un examen general del objeto de estudio, resaltando las características de los materiales que lo componen a partir de sus propiedades ópticas que dan lugar a opacidades y fluorescencias ca-

racterísticas de los materiales, y que permiten diferenciarlos. Con estos métodos se pueden además detectar alteraciones y procesos de degradación. Asimismo, es factible complementar este examen con el uso de técnicas de microscopía óptica de la superficie del objeto. De esta manera es posible determinar las regiones de interés de la superficie del objeto para el estudio con las técnicas espectroscópicas.

Tras este examen, el uso de espectrómetros portátiles permite el estudio in situ del objeto o de una colección. En nuestro caso, se emplean equipos desarrollados en el seno de nuestro grupo, como los espectrómetros de fluorescencia de rayos X (XRF), para el análisis elemental de los materiales. A este equipo se les denominó SANDRA, apocope de Sistema de Análisis No Destructivo por RAYOS X. Por otra parte, la identificación de los compuestos orgánicos e inorgánicos se realiza con espectrómetros de luz infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y Raman. Otros análisis complementarios se pueden hacer con otros espectrómetros de luz visible para medir la reflectancia o la absorción de la luz. Si bien los instrumentos portátiles son menos sensibles que los equipos de laboratorio, la facilidad del análisis no invasivo in situ permite trasladar el laboratorio al acervo, y acceder a colecciones de la mayor relevancia y en mejor estado de conservación. Con ello se evitan las dificultades de traslados, dispositivos de seguridad, costo de seguros, y almacenaje de las obras. Asimismo, el estudio combinado del estudio global y el análisis instrumental del objeto proporciona información muy valiosa para establecer estrategias de muestreo y seleccionar las técnicas más adecuadas para los análisis subsecuentes, así como escoger piezas representativas de la colección para futuros estudios.

Tras el muestreo es posible aplicar, con todo este conocimiento previo, las técnicas de laboratorio, incluyendo técnicas de microscopía óptica y electrónica, análisis espectroscópico, y análisis químicos. Los instrumentos incluyen desde los equipos más estándares hasta el uso de grandes y complejos laboratorios como los de aceleradores de iones y las fuentes de luz sincrotrón.

ESTUDIOS INTERDISCIPLINARIOS

Se ha demostrado que para un estudio integral del patrimonio cultural se requiere de la participación de muchas mentes y numerosas manos, desde muy diversas perspectivas. Es decir, es necesario un estudio dentro de un marco realmente interdisciplinario con la participación e integración de los esfuerzos de humanistas y científicos. Los tiempos en los cuales los

estudios científicos se presentaban como un anexo, con datos que no contienen ninguna interpretación, han sido superados en muchos grupos de investigación. La moda de realizar estudios científicos de los materiales se ha transformado en una necesidad, e incluso un requisito, para validar las interpretaciones sobre los procesos culturales.

Nuestra experiencia en el grupo de Análisis No Destructivo para Estudios en Arte, Arqueología e Historia (ANDREAH) ha permitido demostrar que para el éxito de las investigaciones es necesaria la conformación e integración de un grupo de interdisciplinario, y el desarrollo de un lenguaje común es un punto crucial. Asimismo, la formación de recursos humanos en este ámbito es fundamental para llevar a cabo investigaciones a largo plazo. En nuestro grupo los estudiantes de diversas disciplinas científicas y humanísticas participan activamente en las investigaciones y en la construcción de este nuevo conocimiento sobre las colecciones.

ESTUDIOS DE COLECCIONES Y OBJETOS RELEVANTES

Nuestro grupo de investigación ha estudiado algunas de las colecciones más importantes de México con nuestros equipos y nuestras metodologías. Podemos mencionar entre muchas otras: los análisis de piezas arqueológicas, como artefactos de oro y plata de la tumba 7 de Monte Albán en el Museo de las Culturas de Oaxaca y del Templo Mayor de Tenochtitlán; el estudio de la máscara con mosaico de Malinaltepec descubierta en Guerrero; el ajuar de piedra verde del gobernante Pakal de Palenque, y de su consorte, la Reina Roja; la célebre Ofrenda 4 del sitio olmeca de La Venta; los vasos Teotihuacanos con decoración post-cocción; y las piezas metálicas del cenote de Chichén Itzá. Todos estas piezas son emblemáticas del acervo del Museo Nacional de Antropología. Además, hemos estudiado la lapidaria de Tamtoc, y las piedras verdes y turquesas del Templo Mayor de Tenochtitlan. El único códice prehispánico en México, el códice Colombino, ha sido igualmente analizado en el acervo de la Biblioteca Nacional de Antropología e Historia, por nuestro grupo, con nuestros equipos y métodos.

Para el periodo virreinal, hemos estudiado pinturas sobre tabla del siglo XVI y XVII de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México y de Puebla ((Figura 6), pintura europea del Museo Nacional de Arte y Museo Nacional de San Carlos, y lienzos coloniales del Museo Amparo de Puebla. También hemos caracterizado tintes de textiles coloniales, pigmentos de cerámica vidriada y decoraciones de plumaria del Museo Nacional del Virreinato y del Museo Franz Mayer. Documentos y manuscritos, como el

del escudo de armas de la Ciudad de Puebla en el archivo del ayuntamiento de esa ciudad; y códices coloniales como el De la Cruz Badiano y el Azoyú I, en la Biblioteca Nacional de Antropología e Historia han formado parte de nuestras investigaciones. En el Archivo general de la Nación, analizamos las tintas del Acta de Independencia del Imperio Mexicano de 1821; además de numerosos documentos para conformar una base de datos de tintas ferrogálicas del siglo XVI al siglo XVIII.

En colaboración con el Laboratorio de Diagnóstico de Obras de Arte del Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM, hemos estudiado pintura del siglo XIX de Eugenio Landesio, José María Velasco y Hermenegildo Bustos, así como pintura moderna de David Alfaro Siqueiros en el Museo Nacional de Arte, y pintura colonial sobre tabla y de caballete.

En cuanto a las investigaciones realizadas de códices prehispánicos, gracias a nuestra experiencia de investigación y nuestro trabajo con materiales de referencia de pigmentos orgánicos autóctonos, fue posible colaborar con grupos de investigación europeos para el estudio in situ del códice Zouche-Nutall en el Museo Británico en Londres. Esto muestra los alcances y el notable impacto de nuestras investigaciones.



Figura 6: Estudio por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) con el equipo Alpha Bruker de un retablo colonial de Atlixco, Puebla. Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural, INAH.

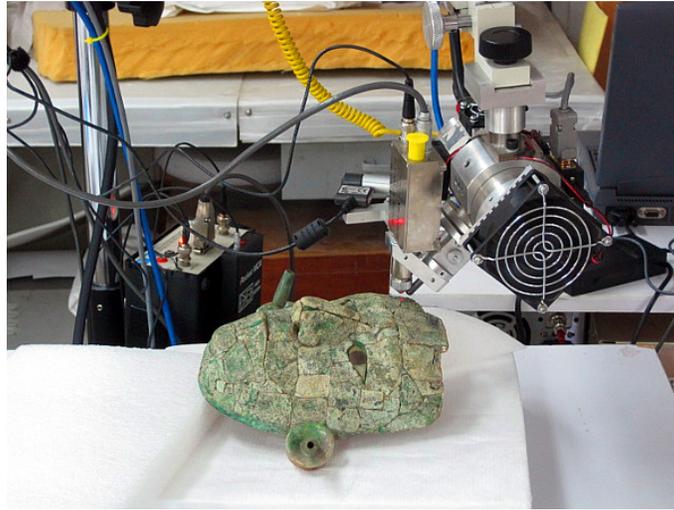


Figura 7: Análisis in situ por fluorescencia de rayos X de la máscara de la Reina Roja mediante el equipo SANDRA, desarrollado en el Instituto de Física de la UNAM. Museo de Sitio de Palenque, Chiapas, INAH.

Por ejemplo, en el caso de la Máscara de Malinaltepec, una de las piezas más famosas del Museo Nacional de Antropología, llevamos a cabo un estudio minucioso de las teselas de colores azul, verde, blanco y naranja, que componen un mosaico sobre la máscara de piedra verde de estilo teotihuacano. Además de identificar la naturaleza mineral de las teselas de azul y verde, las cuales son en su mayoría de amazonita y turquesa, se obtuvieron mediciones de las concentraciones de los elementos que pueden vincular a las teselas con la procedencia de estos materiales. De esta manera se determinó que éstas pueden proceder de regiones que corresponden al noroeste de los Estados Unidos (Arizona y Nevada). Las teselas blancas y naranjas se elaboraron a partir de conchas marinas de *Spondilus*. La piedra verde de la máscara se identificó como clinoclorita, y no como jadeíta, serpentina o cuarzo que son los materiales más usuales para las piedras verdes prehispánicas.

Para la máscara de la Reina Roja de Palenque ((Figura 7), así denominada por estar cubierta completamente por el pigmento mineral rojo de cinabrio, realizamos un estudio similar. Dicha máscara está hecha de malaquita, un carbonato de cobre, probablemente originario de fuentes minerales cercanas. Este es un caso único en cuanto al uso de las piedras verdes prehispánicas. Algo sorprendente es que las teselas blancas de las escleróticas de los ojos (zonas blancas) están hechas de jadeíta de este color, y no

de conchas marinas como sucede en otras máscaras mayas. La superficie de la máscara no está pulida, sino rugosa y con concreciones de carbonatos de calcio. Esto aún no ha sido explicado pero se podría deber a un proceso intencional de su manufactura o a que fue parcialmente estucada.

En el caso del Acta de Independencia del Imperio Mexicano de 1821 ((Figura 8), nuestro análisis de las tintas y papel permitió establecer que se usó una misma tinta en casi todo el documento, pero Agustín de Iturbide, quién sería después el primer emperador de México, firmó con otra tinta. El secretario de la junta, Espinosa de los Monteros, firmó en una segunda ocasión con una tinta diferente —seguramente en otro momento, y la nota en el espacio donde debió firmar el último virrey de México Don Juan O'Donoju, se llevó a cabo posteriormente con otra tinta. El papel presenta un deterioro acorde con un documento de principios del siglo XIX. El documento que analizamos en el Archivo General de la Nación corresponde al segundo original del acta —el primero se perdió en un incendio del congreso a principios del siglo XX. Este segundo original fue robado después de la Independencia, y reapareció en la colección de manuscritos de Maximiliano de Habsburgo durante el Segundo Imperio para perderse nuevamente a su caída. Este segundo original fue devuelto a México en 1960 por una familia española, pero no había sido verificada su antigüedad por métodos científicos hasta nuestro estudio. Este documento fue expuesto en el Palacio Nacional en la Ciudad de México durante los festejos del Bicentenario de la Independencia de México.

OBSERVACIONES FINALES

A partir de lo ya expuesto es claro que las aplicaciones de las técnicas físicas, basadas en el uso de espectroscopías con equipos portátiles constituye una estrategia muy versátil y poderosa para el estudio no destructivo de las colecciones arqueológicas, históricas y artísticas del patrimonio nacional. De esta forma pueden ser abordados una gran diversidad de materiales, objetos y colecciones: Desde un manuscrito hasta una pieza de oro, de una pieza de lítica hasta una pintura, o incluso biomateriales como huesos y dientes. Hay un universo de materiales que pueden ser caracterizados de esta forma.

Al conocer los aspectos materiales de los objetos es posible inferir no sólo de qué están hechos, sino además con qué tecnologías se produjeron, si corresponden a una cierta temporalidad, la procedencia más probable de sus materias primas, y algunas de sus vicisitudes a lo largo de su histo-

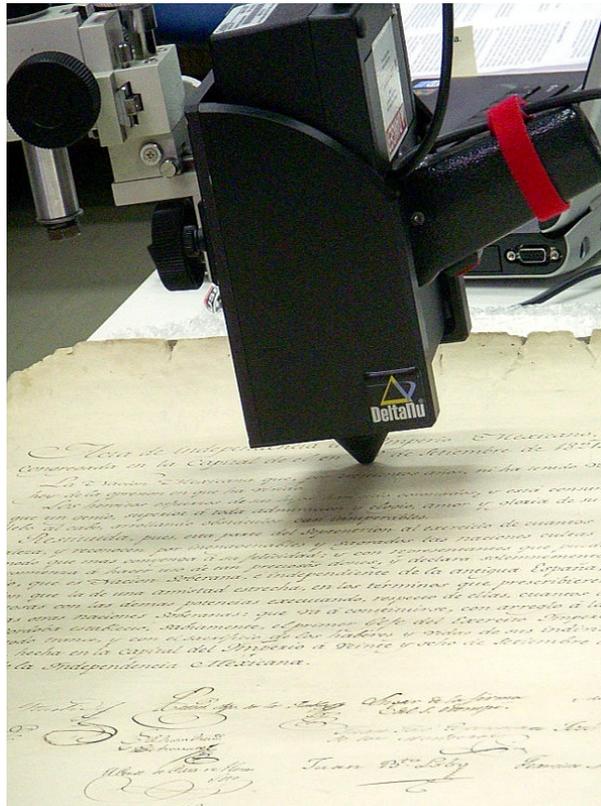


Figura 8: Estudio por Espectroscopía Raman del papel del Acta de Independencia del Imperio Mexicano de 1821 (Equipo Raman Inspector Delta Nu con láser de 785 nm). Archivo General de la Nación.

ria. Cabe señalar que para realizar estas investigaciones ahora se cuenta en México con grupos de investigación del más alto nivel, integrados por científicos y humanistas, y ya no es necesario acudir al extranjero para llevar a cabo este tipo de estudios. En este tipo de investigaciones se construye un conocimiento en el más puro sentido de lo universal.

Además, con este tipo de aplicaciones de la física y las técnicas espectroscópicas, se integran valiosas bases de información de los materiales mexicanos con lo que es posible interpretar los resultados de los análisis de una forma más completa y es más fácil realizar estudios comparativos. Asimismo, se tienen datos fundamentales para poder inferir el deterioro y proponer métodos de conservación más adecuados para nuestro patrimonio. De esta manera, gracias a los estudios de estos materiales usando la luz, los

objetos nos cuentan su historia.

El éxito de esta línea de investigación y del grupo de trabajo interdisciplinario que hemos generado permitió trascender y conformar en 2014 el Laboratorio Nacional CONACyT de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural LANCIC, con lo cual se ha consolidado en gran medida este ámbito de investigación en beneficio de nuestro país.

AGRADECIMIENTOS

Nuestras investigaciones en los acervos nacionales se han realizado con apoyo de numerosos proyectos: CONACyT MOVIL 48939 y 131944, ANDREAH PAPIIT UNAM IN403210 y IN402813, e ICyTDF PICCO10-57. Más recientemente se han recibido apoyo de Proyectos CONACYT de Laboratorios Nacionales LN 279740, LN 293904 y CONACYT CB 239609. Se agradece el valioso apoyo de técnico de Karim López, Francisco Jaimes, Jaqueline Cañetas y Juan Gabriel Morales.

BIBIOGRAFÍA

Se recomienda la serie de tres volúmenes:

Egido M.A. y Calderón T. (Eds.). *La Ciencia y el Arte. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio histórico, vol. I*, Instituto del Patrimonio Histórico Español. Madrid, 2008.

Egido M.A. y Juanes D. (Eds.). *La Ciencia y el Arte. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio histórico, vol. II*, Instituto del Patrimonio Cultural de España. Madrid, 2010.

Egido M.A. y Juanes D. Eds.). *La Ciencia y el Arte, Ciencias experimentales y conservación del patrimonio, vol. III*, Instituto del Patrimonio Cultural de España. Madrid, 2011.

VázquezD., Egido M.A. y Juanes D. (Eds.). *La Ciencia y el Arte, Ciencias experimentales y conservación del patrimonio, vol. IV*, Instituto del Patrimonio Cultural de España. Madrid, 2013.

Bueso M. y Muro C. (Eds.). *La Ciencia y el Arte. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio, vol. V*, Instituto del Patrimonio Histórico Español.

Madrid, 2015.

Bueso M. (Ed.). *La Ciencia y el Arte. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*, vol. VI, Instituto del Patrimonio Histórico Español. Madrid, 2017.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

LOS AUTORES

Esbaide Adem Chahin

Nació en Tuxpan, Veracruz. Realizó sus estudios de Licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Universidad Iberoamericana con Mención Honorífica. Tuvo una estancia de estudios de dos años en el Departamento de Fuentes Intensas de la Radiación del Centro Atómico de Ezeiza, en Buenos Aires, Argentina, becada por la Organización de los Estados Americanos y además de otras estancias cortas de estudio en Canadá, Hungría y Estados Unidos. Es Investigadora Titular del Instituto de Física y ha sido profesora de la Facultad de Ciencias de la UNAM, de la Universidad Iberoamericana. y del Posgrado en Ciencias Físicas de la UNAM. Inició en México una línea de investigación en el empleo de la radiación ionizante en la conservación de alimentos, utilizando principalmente un acelerador de electrones Van de Graaff. Actualmente, realiza investigaciones sobre la modificación y caracterización de materiales poliméricos y cerámicos irradiados. Los resultados de su trabajo han sido presentados en diversos foros y publicados en revistas científicas especializadas nacionales e internacionales.

Escribió varios capítulos de libros, entre ellos uno por invitación para The Polymeric Materials Encyclopedia, CRC Press Inc, publicado en 1996 del cual es coautora. Ha escrito artículos e impartido conferencias de divulgación científica en diversas universidades del país y ha dirigido tesis a un grupo interdisciplinario de jóvenes. Ha desarrollado infraestructura para la investigación en el Instituto de Física de la UNAM, donde, dirige y coordina los trabajos del acelerador de electrones Van de Graaff y actualmente es la responsable del laboratorio. Es miembro de la Sociedad Mexicana de Física, de la Sociedad Mexicana de Cristalografía, de la Academia Mexicana de Ciencias y del Sistema Nacional de Investigadores.

Héctor Alva Sánchez

Es un investigador del Instituto de Física de la UNAM dedicada a la Física Médica y temas interdisciplinarios, específicamente realiza investigación en los siguientes temas: detectores de radiación ionizante para la formación de imágenes médicas, mamografía por emisión de positrones y tomografía por emisión de positrones

Miguel Avalos Borja

Nació en Cd. Hidalgo, Michoacán. Realizó sus estudios de licenciatura y maestría en física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Posteriormente estudio su doctorado en la Universidad de Stanford, California USA, en el área de Ciencia de Materiales e Ingeniería. En 1983 regresó a México para integrarse al naciente Laboratorio de Ensenada del IFUNAM, donde inició el establecimiento de lo que ahora es el laboratorio de cristalografía y microscopía más importante del noroeste del país. Tiene actualmente 150 artículos publicados en diversas líneas de investigación, siendo las más importantes la generación de partículas por métodos biológicos y la caracterización de nanopartículas. Es también un especialista reconocido en los campos de cristalografía, microscopía electrónica (barrido y transmisión) y espectroscopias asociadas a ellos como espectroscopía por dispersión de energía (EDS) y en particular espectroscopía por pérdidas de energía de electrones (EELS).

Rafael A. Barrio

Obtuvo su licenciatura y dos maestrías en la UNAM, su doctorado en Física Teórica en la Universidad de Oxford UK y ha trabajado en la UNAM por 39 años, primero en el Instituto de Investigaciones en Materiales y actualmente en el Instituto de Física, como Investigador Titular C" de tiempo completo. Es Profesor Honorario (Adjunt Professor) del Centre of Excellence in Computational Complex Systems Research de la Universidad Aalto, Helsinki, Finlandia. Actualmente coordina el proyecto Patterning, Segregation and Differentiation in Complex Networks, en el que participan la UNAM, la Universidad de Barcelona, la Universidad de Oxford y la Universidad de Helsinki. Es nivel III del SNI. Ha publicado 171 artículos a nivel internacional, entre 15 libros y capítulos de libros; asesorado 19 tesis. Ha presentado 86 conferencias internacionales y 122 pláticas por invitación, también a nivel internacional, con 1074 entradas en el Citation Index. Su campo de especialidad es muy amplio en Metalurgia, Estado sólido y Sistemas complejos. Ha sido miembro de varios comités. Responsable de varios proyectos DGPA, PRIDE y CONACYT. Se le otorgó el Premio SMF a la Investigación

Científica y primer lugar de Composición Sinfónica "Sor Juana Inés de la Cruz con la suite sinfónica "Primer sueño".

Xim Bokhimi

Nació el 6 de septiembre de 1948, en El Oro de Hidalgo, Estado de México. Realizó la Licenciatura en Física y Matemáticas en el IPN de 1966 a 1969, la Maestría en Física en el IPN y en la Technische Universität Berlin, Alemania de 1970 a 1974, y el doctorado en Física de Materiales en la Technische Universität Berlin y en la Freie Universität Berlin, Alemania de 1974 a 1977. Hizo estudios sobre Literaturas Maya y Náhuatl en la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM de 1983 a 1986. Actualmente es investigador del Instituto de Física, Titular C, Nivel D del PRIDE en la UNAM y Nivel III del Sistema Nacional de Investigadores. Durante los últimos 22 años se ha dedicado al estudio de la cristalografía de sistemas nanocristalinos empleando difracción de rayos X y refinando estructuras cristalinas por el método de Rietveld, lo que le ha dado reconocimiento internacional. Cuenta con un magnífico laboratorio sobre esta área en donde forma a los próximos expertos mexicanos en el tema. Ha publicado cerca de 2 centenas de artículos científicos en revistas internacionales, los cuales han generado 2000 citas.

María Ester Brandan

Es, desde 1991, Investigadora Titular C del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Obtuvo su Licenciatura en Ciencias (Física) en la Universidad de Chile y su Doctorado (Ph.D.) en Física en la Universidad de Wisconsin-Madison. Sus temas de investigación, plasmados en más de 120 publicaciones científicas, cubren un espectro amplio de temas en física nuclear experimental, dosimetría de la radiación y física médica (<http://www.fisica.unam.mx/brandan/>).

ME Brandan creó en 1997, y desde entonces ha coordinado, la Maestría en Ciencias (Física Médica) de la UNAM, programa dirigido a la especialización de físicos e ingenieros en las aplicaciones médicas de la física. Hasta inicios de 2014, casi 100 alumnos se han graduado del programa (www.fisica.unam.mx/fismed).

Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y "Fellow" de la American Physical Society (APS) y de la Academia de Ciencias del Mundo en Desarrollo (TWAS). Ha sido Presidente de las divisiones de Física

Nuclear y Física Médica de la Sociedad Mexicana de Física (SMF), y recibió la Medalla al Desarrollo de la Física en México que otorga la SMF. Sus intereses actuales en investigación incluyen la respuesta de materiales termoluminiscentes a radiación densamente ionizante, en particular a rayos X usados en mamografía, y las técnicas novedosas en mamografía digital. Recibió en 2013 el Premio Universidad Nacional, que otorga la UNAM, en el área de Investigación en Ciencias Exactas.

Efraín R. Chávez Lomeí

Nació en México D.F. el 3 de octubre de 1954. Obtuvo la Licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias en 1979. Realizó sus estudios de posgrado en Francia a partir de 1980 donde obtuvo el "Diplome D'études Approfondies"(D. E. A.), de Física Nuclear en 1982 y el título de "Docteur 3eme Cycle en Sciences Physiques." en 1983 ambos en la Université Louis Pasteur, Strasbourg Iz en 1984 el "Certificat D'informatique Appliquée", por la Université de París Sud, Orsay XI". Realizó una estancia postdoctoral en el "Lawrence Berkeley Laboratory" y en 1988 obtuvo el grado de "Docteur en Sciences", por la Université de París Sud, Orsay XI". Ingresó como Investigador al Instituto de Física de la UNAM en 1984 en donde es Investigador Titular C. Es Investigador Nacional nivel II, miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, del claustro doctoral de la Facultad de Ingeniería UNAM y de la Sociedad Mexicana de Física.

Desde un punto predominantemente experimental, sus temas de interés en investigación científica se ubican alrededor de la física nuclear: astrofísica nuclear, instrumentación nuclear, rayos cósmicos, estructura nuclear, mecanismos de reacción en colisiones entre iones pesados y exóticos. Recientemente se ha interesado en las aplicaciones de la instrumentación clásica nuclear a temas interdisciplinarios en el Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores del IFUNAM.

Ha destinado una parte notable de su actividad a la organización de eventos científicos nacionales e internacionales (21) y a la edición de Memorias, Suplementos y Notas (12).

Como docente ha impartido alrededor de treinta cursos de todos niveles, de bachillerato a doctorado.

Ha dirigido 10 Tesis de Licenciatura en Física y 3 de Doctor en Ciencias,

publicado más de 60 artículos en revistas arbitradas de circulación internacional y presentado más de cien trabajos en congresos. Su trabajo ha recibido más de 500 citas por otros autores.

Gerardo García Naumis

Se dedica a la investigación en estado sólido, física estadística, materiales, nanotecnología y sistemas complejos. Ha recibido diversos premios como lo son: Ciudad Capital Heberto Castillo, Premio Universidad Nacional a Jóvenes Investigadores, Premio Jorge Lomnitz otorgado por la Academia Mexicana de Ciencias, Mentos Quo-Discovery Channel. Algunos de sus trabajos han merecido reseñas en el New York Times, Nature News, Washington Post, Times, habiendo obtenido reconocimientos editoriales en revistas científicas especializadas. También ha impartido conferencias invitadas en numerosos lugares como Francia, Inglaterra, Estados Unidos, España, Canadá, Portugal, Italia, Brasil y Japón.

Arturo Alejandro Menchaca Rocha

Físico (UNAM, 1970); Doctor en Física (Oxford, 1974); posdoctorado (Berkeley, U. California, 1975-76). Físico Nuclear Experimental, Investigador Titular "C" (IFUNAM desde 1986). SNI-III (desde 1988), Premio SMF (1997), Medalla Fernando Alba (2003), Premio Nacional de Ciencias y Artes (2004). Director del IFUNAM (2003-2007), Presidente de la Academia Mexicana de Ciencias (2010-2012), Miembro del Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República (desde 2004), Fellow del Institut of Physics, UK (desde 2006). Miembro de las colaboraciones internacionales ALICE y AMS del CERN (desde el año 2000). Nombrado Miembro de los 300 por la revista Líderes Mexicanos; en 2010; "Mente Quo-Discovery" y "Embajador del Conocimiento" por el Grupo Editorial Quo y el Discovery Channel (2012).

Karo Michaelian

Nació en Inglaterra y es investigador del Instituto de Física, UNAM desde 1991. Su licenciatura es en Geofísica y su doctorado es en Física Nuclear Experimental de la Universidad de Alberta, Canadá, (1987). Realizó una estancia posdoctoral de cuatro años en el Instituto Paul Scherrer, Suiza (1987-1991). Karo recibió la "Medalla de Oro" de la Asociación Profesional de Ingenieros, Geólogos, y Geofísicos de Alberta (APEGGA) en 1981, y el premio "Jorge Lomnitz Adler" de la Academia Mexicana de Ciencia en 2002. Ahora en México, Karo trabaja en la física de nanopartículas y la termodinámica de la vida y la evolución. Actualmente se dedica a experimentos

para probar la teoría termodinámica disipativa del origen de la vida.

Javier Miranda

Cursó estudios de licenciatura, maestría y doctorado en Física, en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Hizo una estancia post-doctoral en la Universidad de California (Davis). Investigador en el Instituto de Física de la UNAM desde 1988. Realizó estancias sabáticas en la Universidad de Chile (Santiago) y en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Es Investigador Nacional Nivel II. Profesor de asignatura en las Facultades de Ciencias y de Química. Integrante del Comité Asesor para las Conferencias de PIXE y del comité editorial de la revista internacional X-Ray Spectrometry. Recibió la medalla Gabino Barreda de la UNAM por el Doctorado en Ciencias (Física) en 1990 y la Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos 2000, en el área de Docencia en Ciencias Exactas. Se especializa en la aplicación de espectrometrías de rayos X a problemas ambientales y en estudios de procesos de capas atómicas internas.

Matías Moreno

Nació en Monterrey, N.L. donde cursó la primaria, secundaria y preparatoria en escuelas públicas graduándose del bachillerato en 1965. Después de un año en el Instituto Tecnológico de Monterrey, donde inició la carrera de Físico, continuó su formación en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México obteniendo el título de Físico en 1971, con una tesis dirigida por Marcos Moshinsky y Tomás Seligman. Doctor en Ciencias en 1976 por la misma institución, después de realizar un trabajo en física de partículas elementales bajo la asesoría de Jean Pestieau en la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica, obtuvo el Doctorado en Ciencias en la propia UNAM en 1976. Ese año ingresó como investigador al Instituto de Física de la UNAM, ahí ha desarrollado tres líneas principales de investigación Física de Partículas Elementales, Teoría de Muchos Cuerpos con especial interés en superconductividad de alta temperatura crítica y, a partir de 2003, física de aceleradores con el objetivo de construir una Fuente de Luz de Sincrotrón en nuestro país. Ha realizado estancias sabáticas en Cern y en el Fermi National Laboratory en Illinois, EE.UU.A. Es también profesor en la Facultad de Ciencias y del Posgrado en Ciencias Físicas de la UNAM. Fue secretario general y vicepresidente de la Sociedad Mexicana de Física, director de la Revista Mexicana de Física y del Instituto de Física de la UNAM.

Jorge Rickards

Investigador Emérito del Instituto de Física de la UNAM, e Investigador Emérito del Sistema Nacional de Investigadores. Su especialidad es la física de radiaciones y el uso de aceleradores de partículas en el estudio y la modificación de materiales. Egresado de la Licenciatura en Física y del Doctorado en Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM, realizó estancias de investigación en la Universidad de Rice y en los laboratorios de Harwell, Reino Unido. Habiéndose iniciado en experimentos de física nuclear, posteriormente se dedicó al empleo de aceleradores en la modificación y el análisis de materiales, área en la cual promovió la creación de dos laboratorios del Instituto de Física, el Acelerador Van de Graaff de 700 kV y el Acelerador Pelletron de 3 MV, y la iniciación de nuevas líneas de investigación, con técnicas como PIXE, RBS, ERDA e implantación de iones. Es profesor de la Facultad de Ciencias y del Posgrado en Ciencias Físicas de la UNAM, en el área de Física de Radiaciones; ha dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Fue asesor de la Comisión Nacional de Energía Nuclear, y Director del Centro de Investigación de Materiales de la UNAM, del cual promovió la transformación a Instituto. Es autor de más de 100 artículos de investigación y varios artículos y libros de divulgación, además de un libro de texto sobre Física de Radiaciones. Actualmente se dedica a la implantación de iones en materiales para modificar sus propiedades ópticas y mecánicas.

Alberto Robledo

Nació en la Ciudad de México. Destacan sus valiosas, originales y variadas aportaciones al conocimiento en áreas de la fisicoquímica en el marco de la mecánica estadística. Por más de 30 años ha impartido cursos en las Facultades de Química y de Ciencias de la UNAM. Desde 1986 es Investigador Titular del Instituto de Física de la UNAM, donde formó el Departamento de Física Química para promover las investigaciones experimentales y organizó nuevos laboratorios con técnicas innovadoras. También ha desarrollado la infraestructura que emplean los grupos de investigación del laboratorio de termofísica de la Facultad de Química de la UNAM, así como el de simulación numérica y de fluidos complejos en el citado Instituto. Su especialidad es la física estadística y sus investigaciones frecuentemente involucran la descripción de transiciones de fase en materia condensada. Sus contribuciones más importantes han sido los estudios sobre fluidos inhomogéneos, solidificación, transiciones interfaciales, microemulsiones, fluidos confinados, cristales líquidos, magnetismo y superconductividad en materiales bi-

dimensionales; además de caminatas aleatorias y dinámica no lineal en el borde del caos y mecánica estadística generalizada. Por su destacada trayectoria ha recibido los premios de “Investigación en Ciencias Exactas” por la Academia de la Investigación Científica A.C., de Ciencia y Tecnología “Manuel Noriega Morales” por la OEA, y “Universidad Nacional en Investigación en Ciencias Exactas. Le fue otorgada la Beca Guggenheim, y el Premio Nacional de Ciencias y Artes.

Mercedes Rodríguez Villafuerte

Obtuvo la maestría y el doctorado en Física de Radiaciones por el University College London de la Universidad de Londres, en Inglaterra. En 1994 se incorporó como investigadora al Instituto de Física, UNAM, y desde 1995 forma parte del Sistema Nacional de Investigadores. Desde su creación, ha participado activamente en la Maestría en Ciencias (Física Médica) del Posgrado en Ciencias Físicas, UNAM. Sus campos de interés son la dosimetría de radiaciones, la simulación Monte Carlo para el transporte de radiación ionizante en materia y sus aplicaciones en física médica. Actualmente es responsable del Laboratorio de Imágenes Biomédicas del IFUNAM.

José Luis Ruvalcaba Sil

Realizó sus estudios de Físico en la Facultad de Ciencias de la UNAM y de doctorado en el Laboratoire d'Analyses par Réactions Nucléaires, en Namur, Bélgica de 1993 a 1997. Desde octubre de 1997 es Investigador del Instituto de Física de la UNAM. Desde 2008 es investigador nacional SNI II y está a cargo del Laboratorio del Acelerador Pelletron desde 2005. Sus estudios se han enfocado a la interacción de radiación con materia y ha desarrollado equipos para el análisis de materiales empleando aceleradores de iones y fluorescencia de rayos X. Entre sus investigaciones destaca la caracterización no destructiva in situ de objetos y materiales históricos y artísticos. Ha consolidado la red de investigación ANDREAH en la que participan grupos de la UNAM, del INAH e INBA. Ha participado de manera relevante en el estudio de las colecciones del patrimonio nacional en los museos más importantes de nuestro país.