

ESCRUTANDO CON LA ANTIMATERIA

SCRUTINIZING WITH ANTIMATTER

A. A. IRIBARREN-ALFONSO^{ID†}

Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana, 10400 La Habana, Cuba. augusto.iribarren@gmail.com[†]
†para la correspondencia

Recibido 18/11/2024; Aceptado 1/9/2025

La Física sugiere que la Naturaleza está constituida por materia y la llamada anti-materia, esta última en menos cantidad. La antimateria la constituyen antipartículas con la misma masa, pero aunque su carga y momento magnético son de la misma magnitud, son opuestos a las de la partícula correspondiente de la materia ordinaria. La colisión de partículas y antipartículas genera fotones de alta energía. En el presente artículo se expone una introducción al uso de la antimateria, en específico de los antielectrones o positrones, para hurgar y estudiar, a partir de su aniquilación con electrones presentes, aspectos tan diversos como el metabolismo de un tejido en un ser vivo y las características de las defectos de vacancia en diversos materiales.

Physics suggests that Nature is made of matter and the so-called anti-matter, the latter in lesser extent. Antimatter is made up of antiparticles with the same mass, but although their charge and magnetic moment are of the same magnitude, they are opposite to those of the corresponding particle of ordinary matter. The collision of particles and antiparticles generates high-energy photons. This paper presents an introduction to the use of antimatter, specifically antielectrons or positrons, to explore and study, through their annihilation with present electrons, aspects as diverse as the metabolism of tissue in a living being and the characteristics of vacancy defects in various materials.

Keywords: Matter and anti-matter (materia y anti-materia); positron annihilation (aniquilación positrónica); positron emission tomography (PET, Tomografía de emisión positrónica); positron annihilation spectroscopy (PAS, espectroscopía de aniquilación de positrones).

I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas nucleares de caracterización utilizan las propiedades de los núcleos atómicos o partículas nucleares como neutrones, iones, protones, electrones y positrones, para estudiar la composición, estructura y propiedades de los materiales [1]. Estas técnicas tienen la característica de que penetran el material en profundidad, lo que posee la gran ventaja de permitir un análisis volumétrico, además de que son no destructivas, muy sensibles y pueden dar información específica y hasta cuantitativa. Como desventajas las técnicas nucleares en general necesitan instalaciones radioprotegidas de acceso limitado, pueden activar las muestras en algunos casos y necesitan tiempos de medición largos. Sus aplicaciones son multidisciplinarias en campos como ciencia de materiales, farmacéutica, energía, medicina, etc.

Las técnicas nucleares pueden clasificarse según la partícula que interactúa con la materia. Así están las técnicas basadas en la interacción de neutrones, como la dispersión de neutrones (ND) [2], la interacción de iones, como la retrodispersión Rutherford (RBS) [3] y la espectrometría de masas con acelerador (AMS); las basadas en la emisión de rayos gamma, como la espectroscopía Mossbauer [4]; las basadas en la interacción con positrones como la espectroscopía de aniquilación positrónica (PAS) [5] y la tomografía por emisión de positrones (PET) [6].

Esta última técnica relacionada con la aniquilación positrónica tiene su gran importancia en el estudio de actividad fisiológica entre otros aspectos en seres vivos y en ciencia de materiales para estudiar la estructura y defectos electrónicos en sólidos

orgánicos o inorgánicos.

En el presente artículo se abordan las técnicas relacionadas con la aniquilación positrónica como método de estudio de seres vivos por medio de la técnica PET y la caracterización de materiales por la técnica PAS.

II. ANTIMATERIA: LOS POSITRONES Y SU ANIQUILACIÓN

La naturaleza está formada por materia y antimateria [7]. Antimateria se denomina a la materia formada por antipartículas que son partículas contrapartes de las partículas ordinarias comúnmente conocidas, aunque la antimateria existe en mucho menores concentraciones que la materia. Cada partícula subatómica posee su antipartícula que posee la misma masa y la magnitud de carga eléctrica, pero poseen carga y momento magnético opuestos. Ejemplos de esto son el electrón (e^-) y su antielectrón o positrón (e^+) que es igual al electrón, pero con carga positiva y con el protón y su antiproton que es un protón con carga negativa. Los átomos de antipartículas no persisten naturalmente, pues se aniquilan con las partículas ordinarias y solo se han obtenido artificialmente aunque han tenido tiempos de vida muy cortos. La aniquilación de materia con antimateria genera gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética.

Una de las antipartículas que ha tenido aplicaciones prácticas es el antielectrón o positrón (e^+) [8]. Los positrones se obtienen por un proceso de desintegración (beta) en que un protón (p^+) dentro del isótopo radioactivo se desintegra en un neutrón (n), un positrón (e^+) y un neutrino ¹ (ν_e) (Figura 1).

¹El neutrino es una partícula subatómica neutra con masa casi cero. Son de tres tipos o "sabores". Este es de tipo electrónico.

Radioisótopos en los cuales ocurre esta desintegración y se emiten positrones son el carbono-11 (^{11}C), el potasio-40 (^{40}K), el nitrógeno-13 (^{13}N), el oxígeno-15 (^{15}O), el aluminio-26 (^{26}Al), el sodio-22 (^{22}Na), el flúor-18 (^{18}F) y el yodo-124 (^{124}I). Cuando el positrón colisiona con un electrón ambos se aniquilan generando dos fotones γ cuyas energías corresponden teórica y experimentalmente al valor de la ecuación de la energía de Einstein $E = m_e c^2$ donde m_e es la masa del electrón de aproximadamente $9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ y c es la velocidad de la luz de unos $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. El valor de esta energía corresponde a un fotón de $E = 511 \text{ keV}^2$, que por su magnitud es una radiación electromagnética ionizante, por lo que puede tener efectos biológicos importantes en seres vivos y es capaz de penetrar profundamente diversos materiales. En el proceso de aniquilación los fotones generados emergen en direcciones prácticamente antiparalelas, o sea, sus vectores de velocidad tienen aproximadamente la misma dirección y sentidos opuestos, es decir, un ángulo de aproximadamente 180° (Figura 2).

ocurre con electrones de niveles más externos o de valencia con menor momento.

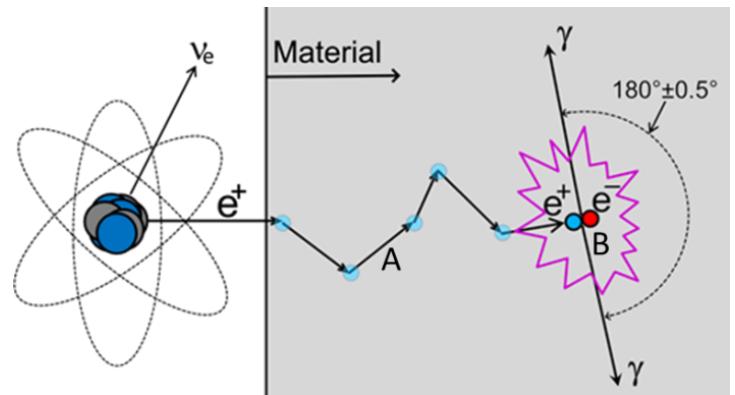


Figura 2. Esquema de la generación de un positrón (e^+), su camino dentro del material (A), su colisión con un electrón (e^-) o aniquilación positrónica (B) y la consiguiente generación de dos fotones con sentido opuesto.

III. APLICACIONES DE LA ANIQUILACIÓN POSITRÓNICA

La aniquilación positrónica se utiliza en la medicina en la tomografía de emisión positrónica (PET por sus siglas en inglés) [9] y en estudios de materiales mediante la espectroscopía de aniquilación positrónica (PAS por sus siglas en inglés) [10, 11].

III.1. Tomografía de emisión positrónica

En la tomografía de emisión positrónica (PET) se administra al paciente por vía intravenosa un radiofármaco compuesto por un radioisótopo que emite positrones, agregado a un fármaco que es un compuesto orgánico específico para estudiar el órgano o la enfermedad de interés. Los positrones emitidos desde el radiofármaco pueden colisionar con los electrones del tejido en el que esté presente. Los dos fotones generados en la colisión son fotodetectados por dos dispositivos contrapuestos, lo que se denomina "en coincidencia". La adquisición de los datos se realiza en coordenadas polares (r, θ) y la intensidad de las imágenes obtenidas son las que determinan o sugieren qué procesos ocurren en los órganos, por lo que es una técnica de imagenología médica (Figura 3). El radiofármaco emisor de positrones se ha comprobado que es seguro para adultos y tienen tiempos de vida media relativamente cortos, por lo que no duran mucho en el organismo. El radioisótopo más utilizado es el fluor-18 (^{18}F) con un tiempo de vida media cercano a los 110 minutos, aunque hay otros radioisótopos que también se utilizan como en galio-68 (^{68}Ga), indio-111 (^{111}In) y el carbono-11 (^{11}C), entre otros menos utilizados o en estudio. Esta prueba permite

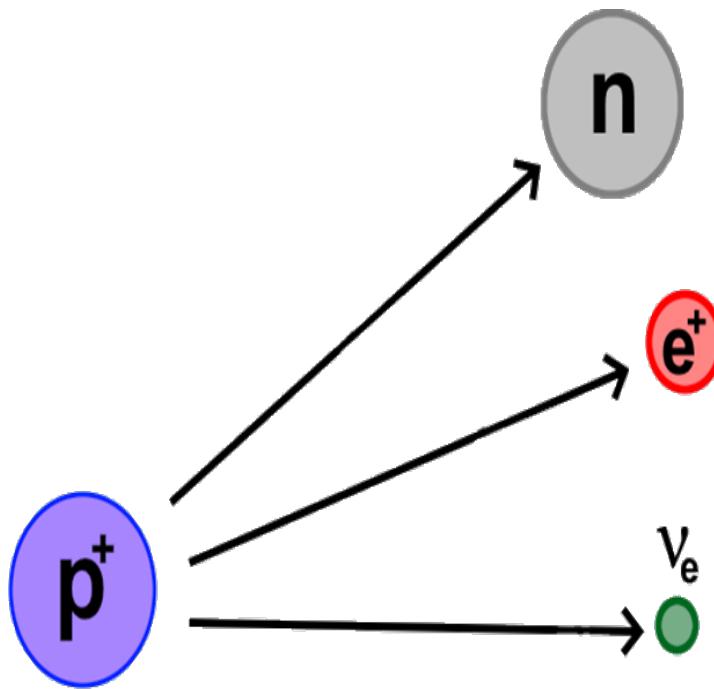


Figura 1. Esquema de la desintegración de un protón (p^+) en un neutrón (n), un positrón (e^+) y un neutrino (ν_e).

En la práctica el valor de energía de los fotones generados no siempre es exactamente 511 keV, sino que hay un pequeño corrimiento de este valor. Esto se debe a que en el momento de la colisión electrón-positrón los electrones no están en reposo, sino en movimiento, por lo que, según la componente de este movimiento sobre la dirección de la colisión, ocurre una variación estadística ΔE a causa de un efecto Doppler³. El valor de $E \pm \Delta E$ será menor y más cercano a cero si la aniquilación

²keV = 10^3 eV . La unidad eV, electronvoltio, es la energía cinética adquirida por un electrón en el vacío con una diferencia de potencial de 1 voltio (V). Se asocia también con la energía de los fotones. La energía de un fotón de luz visible está en el rango entre 1.6 eV y 3.2 eV. En física de altas energías se trabajan megaelectronvoltio (1 MeV = 10^6 eV) y gigaelectronvoltios (1 GeV = 10^9 eV).

³El efecto Doppler se ha usado ampliamente en diversas aplicaciones habituales. Está relacionado con la variación de la frecuencia de una onda cuando el emisor se mueve respecto al receptor o viceversa. Un ejemplo de él es la variación del sonido de la sirena de una ambulancia o carro patrulla cuando se acerca al receptor y cuando se aleja. Este ejemplo es con ondas sonoras, pero también ocurre con ondas electromagnéticas como la luz.

estudiar la actividad metabólica y funcionamiento de sus tejidos y órganos y se ha empleado mucho en los campos neurológicos, oncológicos y cardiovasculares, aunque en la actualidad tiende a extenderse a otros campos. Aunque pueda preocupar la exposición a estas radiaciones, las dosis tan bajas no constituyen peligro alguno para el paciente, lo que ha sido confirmado por el uso por décadas de esta técnica sin la detección de efectos dañinos por esta causa. La técnica de PET tiene ventajas sobre otras técnicas, pues puede realizar la detección temprana de enfermedades y la efectividad de un tratamiento a partir de la observación directa de la actividad celular.

La tomografía de emisión de positrones puede brindar información que no se obtiene por otras técnicas de imagenología como la tomografía axial computarizada (TAC) y la resonancia magnética nuclear (RMN). La técnica PET es capaz de aportar información de cómo están funcionando algunas partes del organismo, más allá de aportar una simple imagen de esas partes. Suele utilizarse en la detección temprana de enfermedades, aunque no se descartan las ventajas posibles del uso combinado de varias técnicas. Además, es una técnica menos invasiva que, por ejemplo, la cirugía exploratoria. Lamentablemente la necesidad de exponer al paciente a radiaciones ionizantes, su alto costo y la necesidad de instalaciones especializadas son desventajas que limitan su uso.

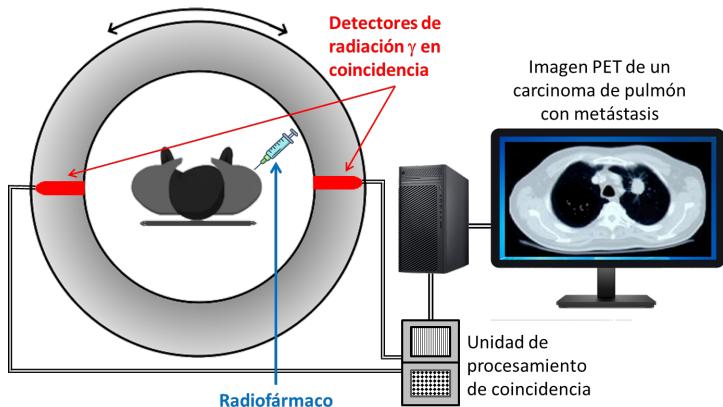


Figura 3. Esquema de un equipo para PET y la imagen de un carcinoma de pulmón con metástasis.

III.2. Espectroscopía de aniquilación positrónica.

Los materiales perfectos no existen. Aunque se han necesitado materiales casi perfectos, en general, se aprovecha el grado de perfección o imperfección a conveniencia en aplicaciones [12]. En los materiales siempre hay distorsiones estructurales y estequiometrías como intercambio de átomos de sus posiciones "correctas", impurezas que sustituyen los átomos "correctos", átomos no enlazados como ocurre en la superficie, ausencia del átomo "correcto" en la estructura o vacancia, dislocaciones que son cadenas de distorsiones, y otros defectos [13, 14].

⁴1 ps es 0.000 000 000 001 s o sea, 10^{-12} s.

Las vacancias atómicas son defectos puntuales en que falta al menos un átomo en un sitio de la red cristalina de un material. Las vacancias existen de manera intrínseca o natural y su concentración en el material depende de la temperatura, la energía de formación y otras características y parámetros. En el campo de los semiconductores y los metales, aunque también en otros tipos de materiales, las vacancias son relevantes, pues inducen cambios en las propiedades mecánicas, estructurales, ópticas, eléctricas y otras [15]. Por ello es necesario estudiarlas para conocer su comportamiento y características [16]. No obstante, no son muchos los métodos de estudio de vacancias y son significantes aquellos que se basan en la aniquilación de positrones por colisión con electrones.

En los estudios de materiales mediante la espectroscopía de aniquilación positrónica (PAS) se utiliza frecuentemente el sodio-22 (^{22}Na) debido a su tiempo medio de vida de 2.6 años por lo que puede utilizarse tiempos largos. Una de las técnicas derivadas de PAS tiene en cuenta la probabilidad de colisión del positrón con un electrón en el material que se refleja en el tiempo de vida, o sea, el tiempo entre la generación del positrón en su fuente y su aniquilación y detección del fotón que se denomina espectroscopía tiempo de vida de la aniquilación positrónica (PALS por sus siglas en inglés). El positrón, al penetrar en un material, puede inicialmente transitar por él, termalizándose sin interacción, o incluso ser rechazados por los núcleos atómicos con carga positiva como él (proceso A de Figuras 2 y 4), hasta que encuentre un electrón como ilustra el proceso B en Figuras 2 y 4. En el material "perfecto", o sea, sin defectos y alto grado de cristalinidad es muy probable que esto ocurra en tiempos breves de no más de aproximadamente 150 ps⁴. Si el material tiene vacancias aisladas o mono-vacancias, o sea, ausencias de átomos como defectos puntuales, habrá algo menor densidad local de electrones, la probabilidad de aniquilación se reduce un poco y el tiempo de vida del positrón crece y está en un rango aproximado entre 200 ps y 300 ps, en lo que influye significativamente la concentración entre otros parámetros (proceso C en Figura 4). Si hay zonas con muchas vacancias agrupadas, o sea, clústeres de vacancias o huecos la concentración de electrones disminuye más, por lo que la probabilidad de aniquilación es mucho menor y dependerá en gran medida de la concentración, tamaño y características de cada clúster (proceso D en Figura 4). El tiempo de vida del positrón en los huecos o clústeres será mayor que 300 ps y en algunos materiales puede llegar a los nanosegundos. La probabilidad de aniquilación del positrón que está directamente relacionado con el conteo de fotones, se calcula a partir del decaimiento detectado de la señal en el tiempo y utilizando y ajustando la expresión:

$$N_t(t) = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{t_i} \exp\left(-\frac{t}{t_i}\right) \quad (1)$$

donde i se relaciona con el proceso de aniquilación, o sea, si ocurre en el material "perfecto", en monovacancias o en clústeres de vacancias o huecos más o menos grandes, n es la cantidad mínima de posibles procesos, I la intensidad

o conteo de fotones γ de la emisión obtenida mediante un detector y t_{subi} es el tiempo de vida del positrón que es característico del decaimiento relacionado con la velocidad de aniquilación del positrón que se muestra en Figura 5. En la Figura 5, el mejor ajuste con la expresión (1) son dos exponenciales decrecientes con valores de tiempos de vida τ_1 menor, relacionado con la aniquilación positrónica combinadas en el material “perfecto” y en monovacancias catiónicas, y τ_2 relacionado con la aniquilación positrónica en clústeres complejos de vacancias. Los valores I_1 e I_2 indican el porcentaje de ocurrencia de cada proceso.

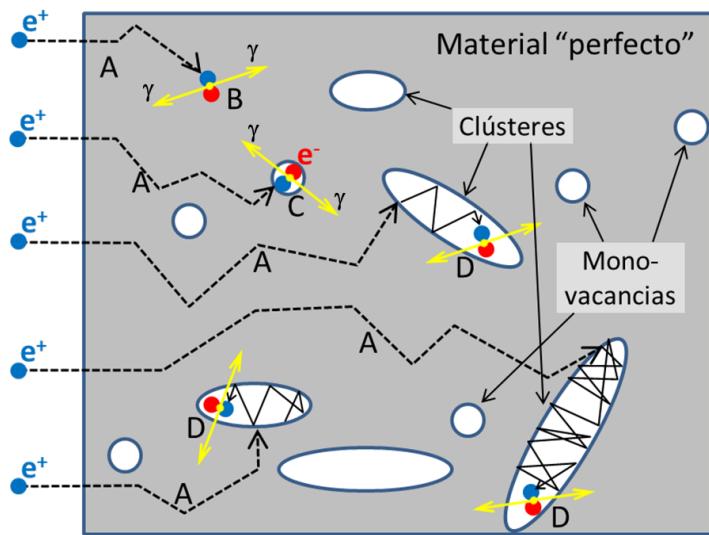


Figura 4. Esquema de la aniquilación positrónica en vacancias y clústeres en un material.

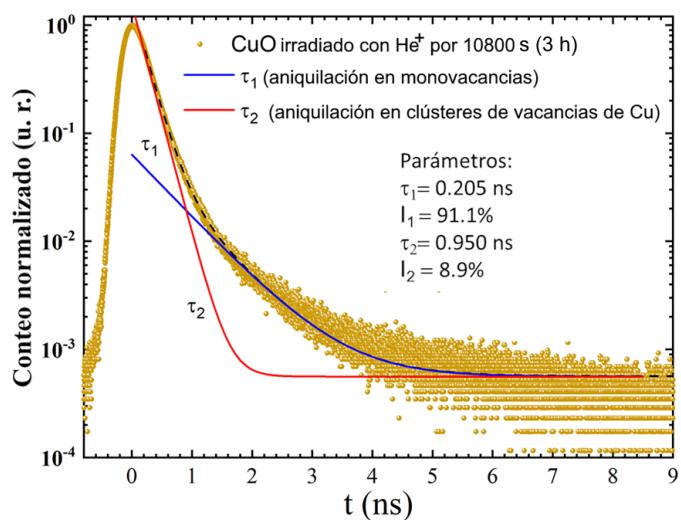


Figura 5. Espectro de tiempo de vida del positrón en un óxido metálico irradiado con iones de He.

En materiales no conductores existe la probabilidad de que la interacción entre un positrón y un electrón devenga en un estado ligado inestable llamado positronio, en que positrón y electrón “giran” alrededor de su centro de masa manteniendo

una distancia de 0.106 nm. Si el espín[Espín (del inglés “spin”, en español “giro”) representa el momento magnético de las partículas elementales como el electrón y el positrón, recordando a un cuerpo cargado eléctricamente en rotación.] del electrón y el del positrón son paralelos (espín=1), se forma un estado llamado orto-positronio (o-Ps), con vida media de 140 ps, mientras que si son de espines opuestos (espín=0) resulta la especie para-positronio (p-Ps) con vida media de 125 ps. El o-Ps y el p-Ps se forman en relación 3:1.

Por otra parte, el estudio de la dispersión $\pm \Delta E$ del valor de la energía del fotón debido al momento del electrón con que se aniquila el positrón se denomina espectroscopía de ensanchamiento Doppler (DBS por sus siglas en inglés). La relación entre la desviación ΔE de la aniquilación positrónica con electrones de alto momento y aquella con electrones de valencia es capaz de indicar las características del defecto de vacancia que puede ser compleja [6]. Los resultados de esta técnica junto con la determinación del tiempo de vida del positrón permite dilucidar las características relevantes de las vacancias, grupos de vacancias, huecos, su concentración, su tamaño y hasta cómo se comportan bajo la acción de tratamientos térmicos, dopajes, irradiación, etc. en metales, aleaciones, semiconductores, materiales complejos como las zeolitas y otros materiales semejantes, pero también en materiales orgánicos como los polímeros.

Las técnicas de PAS tienen como gran ventaja poder resolver tamaños de defectos por debajo de los 10 nm a profundidades de decenas de micrómetros. A esta posibilidad solo se acercan las microscopía de efecto túnel (STM) y de fuerza atómica (AFM), pero a tamaños de pocos nanómetros y posee mayor resolución que la microscopía de transmisión (TEM). Por otra parte la técnica de PAS es sensible a concentraciones de defectos hasta algo menos que 1 ppm y profundidades de hasta decenas de micrómetros, mientras que ninguna otra técnica se acerca a estas posibilidades [6]. Las técnicas de PAS tienen posibilidades únicas de diferenciar la presencia de monovacancias, pequeños clústeres de solo algunas vacancias, grandes clústeres de vacancia, concentración de defectos de vacancias sobre todo en materiales nanoestructurados donde la superficie es relevante, nanoprecipitados en metales, aleaciones y semiconductores y su prevalencia y el estudio de estos y otros detalles cuando el material se somete a acciones externas.

IV. CONCLUSIONES

En resumen las técnicas basadas en aniquilación de positrones, tanto las de diagnóstico de humanos y seres vivos como las de estudio de defectos en materiales aportan importantes informaciones que no se obtienen por otras vías. Sus usos poseen diversas ventajas sobre otras técnicas debido a las posibilidades de penetración de positrón su y reacción específica al medio. Sin embargo, ha de considerarse que el uso combinado de estas con otras técnicas permite lograr una caracterización más profunda y certera.

V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está bajo los proyectos PN223LH008-66 del Programa Nacional de Nanociencias y Nanotecnología (PN3) y PN223LH010-58 del Programa Nacional de Ciencias Básicas y Naturales (PNCB), Cuba.

REFERENCES

- [1] S. Luo, "Nuclear Analytical Techniques and Methods", in *Nuclear Science and Technology: Isotopes and Radiation* (Springer, Singapore, 2023), pp. 91–130.
- [2] D. Liu, K. Song, W. Chen, J. Chen, G. Sun, and L. Li, Nucl. Anal. **1**, 100011 (2022).
- [3] M. Rocchini, M. Chiari, E. Pasquali, A. Nannini, and K. Hadynska-Klek, Nucl. Instrum. Meth. B **486**, 68 (2021).
- [4] B. Wareppam, E. Kuzmann, V. K. Garg, and L. H. Singh, J. Mater. Res. **38**, 937 (2023).
- [5] F. A. Selim, Mater. Charact. **174**, 110952 (2021).
- [6] J. Trotter, A. R. Pantel, B. K. K. Teo, F. E. Escoria, T. Li, D. A. Pryma, and N. K. Taunk, Adv. Radiat. Oncol. **8**, 101212 (2023).
- [7] L. Canetti, M. Drewes, and M. Shaposhnikov, New J. Phys. **14**, 095012 (2012).
- [8] D. J. Pons, A. D. Pons, and A. J. Pons, Phys. Essays **27**, 26 (2014).
- [9] G. Muehllehner and J. S. Karp, Phys. Med. Biol. **51**, R117–R137 (2006).
- [10] R. W. Siegel, Annu. Rev. Mater. Res. **10**, 393 (1980).
- [11] J. Cízek, J. Mater. Sci. Technol. **34**, 577 (2018).
- [12] O. Pedgley, "Desirable Imperfection in Product Materials", in *Design's Big Debates - DBS International Conference*, edited by Y. Lim, K. Niedderer, J. Redström, E. Stolterman, and A. Valtonen (Umeå, Sweden, 16-19 June 2014).
- [13] H. G. Van Bueren and R. Smoluchowski, Phys. Today **14**, 62 (1961).
- [14] K. Müllen, Nat. Rev. Mater. **1**, 15013 (2016).
- [15] M. Wuttig, D. Lüsebrink, D. Wamwangi, W. Wehric, M. Gilleßen, and R. Dronskowski, Nature Mater. **6**, 122 (2007).
- [16] A. Seeger, Appl. Phys. **4**, 183 (1974).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) license.

