

**La extraordinaria vida de  
María Goeppert-Mayer y su  
primer descubrimiento científico:  
la absorción de dos fotones**  
***The extraordinary life of Maria  
Goeppert-Mayer and her first  
scientific discovery: two-photon  
absorption***

**Fis. Raquel Baza Medina<sup>1</sup>**

**Dr. Luis Guillermo Mendoza Luna<sup>1,2</sup>**

**Dr. César Augusto Guarín Durán<sup>1,2</sup>**

**Dr. Emmanuel Haro Poniatowski<sup>1</sup>**

**Dr. José Luis Hernández Pozos<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Departamento de Física,  
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.*

<sup>2</sup> *Investigadores por México – Departamento de Física,  
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.*



### Resumen

Este texto ofrece una mirada a la vida de una científica poco conocida y que, sin embargo, hizo contribuciones importantes a la física del siglo XX: María Goeppert-Mayer. Además de poner en contexto su obra y su vida, explicamos el primer fenómeno que ella estudió durante su carrera científica, que se conoce como absorción de dos fotones. Se mencionan algunos de sus antecedentes, como la mecánica cuántica y los niveles de energía de las sustancias, y se da información sobre otros desarrollos modernos, como la invención del láser y otras aplicaciones de actualidad.

### Abstract

This manuscript gives an insight into the life of a little-known female scientist who, nevertheless, made significant contributions to 20<sup>th</sup>-century physics: Maria Goeppert-Mayer. Besides putting context into her life and work, we explain the first physical phenomenon she analyzed in her scientific career, known as two-photon absorption. In addition, some background information is given, such as quantum mechanics and the energy levels of substances. Other modern developments, such as the creation of the laser and novel applications of two-photon absorption, are examined.

### Palabras clave

*absorción de dos fotones, IR780, láser, mecánica cuántica, óptica no lineal.*

### Keywords

*two-photon absorption, IR780, laser, quantum mechanics, non-linear optics.*

### Contexto histórico:

#### la física en Europa en el siglo XIX

La ciencia de la física experimentó un progreso sin precedentes durante el siglo XIX [Flores Valdés, 1997]: todas sus ramas, tanto teóricas como experimentales, se desarrollaron a una velocidad vertiginosa comparada con su desarrollo anterior. Tal fue el avance que, a finales del siglo XIX, se consideraba que todos los problemas en física habían sido resueltos y que los pocos problemas que quedaban abiertos se resolverían tarde o temprano, en una lógica puramente acumulativa, y que no implicaría ningún avance conceptual o ruptura seria con los principios establecidos hasta entonces.

En esa época, Europa era el centro del mundo intelectual y científico, y fue por supuesto en donde científicos varones lograron los avances mencionados antes. La exclusión sistémica de las mujeres de la ciencia y de otras actividades era la norma general de aquella época. Como veremos más adelante, el panorama de la física (tanto científico como social) cambió notablemente en el siglo XX.

#### Sobre María Goeppert-Mayer

Aunque actualmente es cada vez más común que las mujeres hagan carreras en las áreas de ciencia e ingeniería, esto era extremadamente inusual a comienzos del siglo XX<sup>1</sup>.

Es en este contexto histórico en el que María Goeppert-Mayer inició su educación y su carrera académica. María Goeppert-Mayer nació en Katowice, Alemania (actualmente parte de Polonia) en 1906,

<sup>1</sup> Esta situación ha sido replicada en México, pues la primera mujer titulada en física en nuestro país fue Alejandra Jáidar (1938-1988), quien se graduó en 1961; para conmemorar su vida y su carrera académica, el auditorio del Instituto de Física de la UNAM lleva su nombre.

hija de Friedrich Goeppert, profesor de Pediatría en la Universidad de Göttingen y de Maria Wolff [Nobel Prize Outreach, 2022]. Su padre siempre se preocupó por la educación de su hija María y le procuró una juventud rodeada de intelectuales y de una intensa actividad cultural, lo cual sin duda le dio un impulso a su vocación por la ciencia [Grzybowski y Pietrzak, 2013].

María ingresó a la Universidad de Göttingen en 1924 para estudiar Matemáticas; sin embargo, pronto se vio atraída a la Física. Completó sus estudios de doctorado en física teórica en 1930 [Nobel Prize Outreach, 2022]. Su tesis doctoral tuvo como resultado la predicción del llamado fenómeno de absorción de dos fotones, que será explicado en la siguiente sección y cuenta, además, con aplicaciones muy diversas que lo hacen relevante tecnológicamente.

### **Niveles de energía y el descubrimiento del fenómeno de absorción de dos fotones**

Uno de los grandes avances en la física de principios del siglo XX fue el descubrimiento de que todas las cosas que vemos en el mundo natural están formadas por partículas diminutas que conocemos como átomos, y que éstos se combinan para formar moléculas y el resto de los objetos macroscópicos de nuestro mundo. Otro avance importante fue el descubrimiento de los electrones y su posición alrededor del núcleo atómico, así como la investigación de cómo los electrones se mueven alrededor de los átomos. Estos hallazgos conformaron la base de la (entonces nueva) ciencia de la mecánica cuántica. Sin embargo, los avances no se quedaron ahí, y todavía en la actualidad seguimos atestiguando avances en la ciencia fundamental y la tecnología, que tienen sus raíces en los descubrimientos mencionados.

Una observación hecha por los científicos en el siglo XIX es que ciertas sustancias emiten luz de ciertos colores al arder [Beauty of Science, 2016, Beauty of Science, 2017, MIT OCW, 2013]; a esta serie de colores se le llamó el espectro de emisión de la sustancia y fue algo que los físicos no entendían, puesto que estaba en contradicción con lo que se sabía sobre el comportamiento de la materia hasta entonces. Sin embargo, con la llegada de la teoría cuántica, los espectros de los átomos y, posteriormente, también de las moléculas, pudieron ser explicados satisfactoriamente. Dicha explicación emerge de manera natural, como una consecuencia de postular que los electrones en átomos y moléculas solamente poseen ciertas energías de un “catálogo” de posibles energías definidas; a dicho catálogo se le llama el conjunto de niveles de energía (o espectro) del átomo o molécula.

Dichos espectros pueden representarse como un diagrama de líneas horizontales apiladas (ver la figura 1); cada línea representa un nivel de energía permitido para el sistema (atómico o molecular). Los espacios entre líneas son representativos de las diferencias en energía entre los respectivos niveles. Cuando uno de tales sistemas recibe o libera energía (en forma de luz, calor o electricidad, por ejemplo), el estado energético del sistema puede cambiar y esto usualmente se representa mediante flechas que apuntan hacia arriba o hacia abajo, según corresponda.

La idea anterior implica una ruptura importante con la física anterior al siglo XX, pero conviene hacer una breve digresión para tratar el fenómeno de la luz.

### **Sobre la luz y los láseres**

Una de las primeras cosas que aprendemos

sobre la luz es que es fantásticamente rápida, al punto en que es capaz de darle la vuelta 7.5 veces al planeta Tierra en tan solo un segundo [O'Donoghue, 2019]. En algún momento de nuestras vidas todos nos hemos preguntado qué es la luz. Si bien es complicado dar una respuesta simple y satisfactoria a esta interrogante, que incluso tiene implicaciones filosóficas, podemos mencionar que desde hace siglos se han realizado teorizaciones y experimentos para comprender mejor el fenómeno de la luz: los antiguos filósofos griegos dieron las primeras explicaciones al fenómeno de la luz. En tiempos más recientes, Sir Isaac Newton llevó a cabo experimentos clásicos con prismas y descubrió que la luz que pasa a través de ellos forma un arcoíris. Más tarde, en el siglo XIX, el físico James Clerk Maxwell descubrió que la electricidad y el magnetismo están íntimamente ligados a la luz. Para ampliar la discusión sobre la historia de las ideas sobre la luz, el lector interesado puede consultar [Cetto, 1987].

Los párrafos anteriores describen someramente el contexto histórico y científico de uno de los inventos más importantes del siglo XX: los láseres.

La palabra láser en realidad es un acrónimo del idioma inglés que en español significa “amplificación de luz por emisión estimulada de radiación” [Aboites, 1991]. El proceso que gobierna el funcionamiento del láser fue propuesto de forma teórica por Einstein en 1917 y solamente fue construido en un laboratorio por el científico Maiman en 1960. Para entender el funcionamiento de un láser, se requieren las ideas del espectro (o niveles de energía) de las sustancias que ya hemos estudiado, así como de algunas ideas adicionales sobre la luz introducidas por Einstein que, aunque no serán el tema de discusión aquí, referi-

remos al lector a los siguientes textos de divulgación para mayores detalles: [Aboites, 1991, Ibarra Villalón et al., 2018].

Para propósitos de nuestra exposición, es suficiente contar con la idea de que el láser es un dispositivo que emite luz muy intensa y dirigida (en línea recta, de hecho) que puede interpretarse como ondas (a veces llamadas electromagnéticas) o como partículas, según lo visto líneas arriba. En particular, nos interesa la idea de que la luz se expresa como partículas, a las que llamamos fotones. Cuando se enciende un apuntador láser, por ejemplo, éste emite una cantidad enorme de fotones, más de varios miles de millones por segundo, y cada uno de ellos tiene el color del láser (verde, rojo, azul, etc.).

Aun así, en el laboratorio de investigación necesitamos láseres más grandes y potentes para estudiar la materia y sus interacciones [Mendoza-Luna et al., 2019]. Estos equipos han evolucionado en potencia y en complejidad desde que el primer láser fue construido, al grado de que ahora cada fotón que producen es capaz de afectar la materia en el nivel fundamental, lo cual se explicará con mayor detalle en la siguiente sección, donde introduciremos la noción de la óptica no lineal, y dentro de ese contexto hablaremos sobre el tema que María Goepfert-Mayer analizó en su tesis doctoral y que más nos interesa en este artículo: la absorción de dos fotones o bifotónica.

### **Notas sobre la óptica no lineal y la absorción bifotónica**

Una de las ramas de la física que se encuentra más en boga en la actualidad es la de la óptica no lineal. Los fenómenos que estudia esta disciplina pueden entenderse, intuitivamente, como los que ocurren cuando los fotones que impactan sobre una muestra tienen tanta energía como

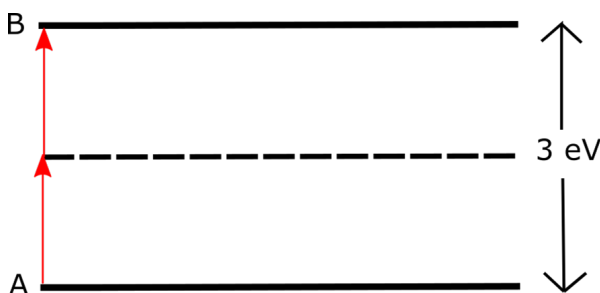
para afectar la estructura interna de las sustancias y que no ocurren cuando fotones de baja intensidad (como los de las fuentes de luz distintas al láser) interactúan con la materia.

Los fenómenos no lineales fueron observados en el laboratorio tan pronto como el primer láser funcional fue demostrado experimentalmente por Maiman en 1960 [Aboites, 1991]. En 1961, los científicos Kaiser y Garrett de los Laboratorios Telefónicos Bell observaron por primera vez la absorción de dos fotones en un sistema de cristales que contienen el elemento europeo [Kaiser y Garrett, 1961]. Desde entonces, este fenómeno se ha observado en multitud de sustancias y sistemas.

Para explicar el fenómeno, retomemos la idea del espectro, pero uno de un sistema muy simple: pensemos en un átomo que tiene dos niveles representados en la figura 1 por dos líneas horizontales. Pensemos que la separación entre ellos es 3 eV (se lee tres electrones-volt); por el momento, la unidad de medida de la energía es irrelevante. En la figura 1 también aparece una línea horizontal punteada. Si el sistema se encuentra en el nivel inferior, marcado como A, e incide sobre dicho sistema un fotón de 1 eV, entonces dicho fotón no será absorbido; tampoco un fotón de 2 eV sería absorbido, ni tampoco uno de 4 eV: para que un fotón sea absorbido, debe tener una energía exactamente de 3 eV, y solamente de esa manera el sistema llegará al estado B.

Sin embargo, pensemos por un momento en la siguiente posibilidad ilustrada en la figura 1: ¿qué pasa si dos fotones de 1.5 eV cada uno inciden al mismo tiempo sobre el sistema cuando éste se encuentra en su estado A? Lo que ocurre entonces es, precisamente, el fenómeno de absorción de

dos fotones. En este caso, el sistema absorbe ambos fotones (con una energía total de 3 eV) y el sistema pasa al estado B. Podemos pensar en que el sistema pasa del estado A al estado representado por la línea punteada y que, inmediatamente después, debido al segundo fotón (que, recordemos, incide al mismo tiempo que el primer fotón), el sistema pasa del nivel de la línea punteada al estado B.

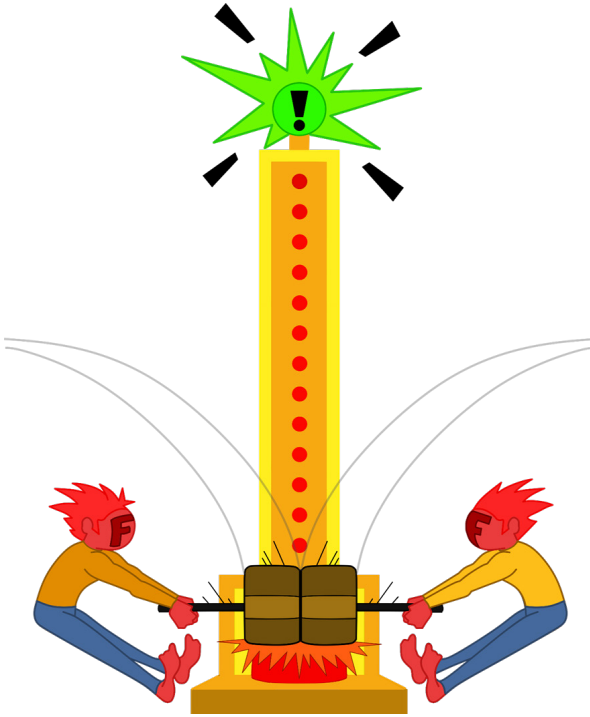


*Figura 1. Esquema genérico de la absorción de dos fotones. Un fotón de 3 eV puede hacer que el sistema pase del estado A al estado B; también es posible que dos fotones de 1.5 eV cada uno (flechas rojas) consigan la misma transición de A a B. Esto último se conoce como absorción de dos fotones.*

A manera de analogía, imaginemos el juego de feria llamado martillo. Este juego se muestra en la figura 2. Requiere que una persona golpee con fuerza en la base para impulsar un bloque que tiene como objetivo llegar a la parte más alta; si una persona golpea con fuerza apenas suficiente para llegar solo a la mitad del camino, necesitará la ayuda de una persona más que al golpear con la misma fuerza le imprima el impulso suficiente para que, sumada con la fuerza de la primera persona, el bloque llegue a la cima del juego y ambos participantes ganen el juego. En este ejemplo, cada persona representa a un fotón: por separado, cada uno puede llegar solo a la mitad del camino (ver la figura 1), pero si ambos fotones se absorben, los dos juntos



tendrán suficiente energía para llegar al nivel superior.



*Figura 2. El juego del martillo como analogía para entender el fenómeno de la absorción de dos fotones.*

La absorción de dos fotones tiene varias propiedades importantes; comencemos nuestra exposición enfocándonos en lo siguiente: al ser expuestas a una intensidad de luz lo suficientemente alta, no todas las sustancias presentan la misma disposición de absorber dos fotones de la manera en que lo hemos discutido hasta ahora. En otras palabras, hay algunas sustancias más propensas a absorber dos fotones que otras. Más aún: el color de la luz (es decir, de los fotones) que impacta sobre el sistema es otro factor que determina cuán viable sea la absorción de dos fotones.

A partir de las consideraciones anteriores, conviene hablar de la probabilidad de la absorción de dos fotones, la cual depende

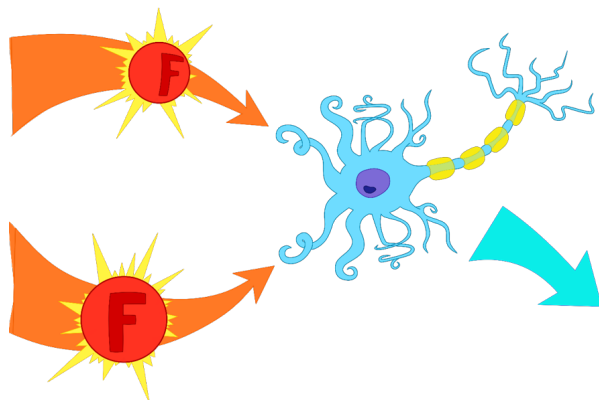
del color de los fotones incidentes, la intensidad de la luz, así como de la naturaleza de la sustancia misma. Esta probabilidad recibe el nombre técnico de “sección eficaz de absorción de dos fotones” y es una propiedad muy importante de las sustancias.

Otra propiedad de la absorción de dos fotones que es clave para comprender las aplicaciones es la siguiente: para observar la absorción de dos fotones es necesario producir intensidades de luz muy altas y hemos señalado a los potentes láseres de los laboratorios de investigación como los responsables de lograr tales intensidades. Sin embargo, también es preciso concentrar toda esa energía utilizando una lente (que es similar a una lupa) en un espacio muy pequeño para alcanzar las intensidades necesarias. Cuando eso ocurre, la región que contiene luz con suficiente intensidad para iniciar el fenómeno se vuelve realmente pequeña, en especial cuando se le compara con la región de enfoque de una luz en el régimen lineal. Esta propiedad, que a primera vista parece una curiosidad, es de singular importancia en ciertas aplicaciones, puesto que permiten que la reacción de dos fotones ocurra en una región minúscula del espacio.

Si bien el fenómeno que nos ocupa tiene numerosas aplicaciones en varios campos de la ciencia y la tecnología, por cuestiones de espacio vamos a mencionar solamente un par de aplicaciones de la absorción de dos fotones.

En primer lugar, destaca la microscopía de fluorescencia. Usualmente, durante el estudio de un tejido biológico, las moléculas que forman dicho tejido (ADN, aminoácidos, melanina, etc.) podrían ser excitadas por luz ultravioleta o visible. Una vez que las moléculas absorben la energía deben libe-

rar parte de ésta al entorno, y muchas veces lo hacen generando luz, la cual es conocida como luz fluorescente o fluorescencia. Sin embargo, como las moléculas pueden ser dañadas cuando se iluminan con luz ultravioleta, ésta se sustituye por luz infrarroja. Si este tipo de luz infrarroja proviene de un láser y posee una cantidad elevada de fotones, entonces aumenta la probabilidad de que la absorción simultánea de dos fotones ocurra, permitiendo ciertas ventajas sobre la microscopía de fluorescencia, como no ser destructiva para el tejido biológico (ya que los tejidos biológicos absorben menos la luz infrarroja que la ultravioleta), tener una mayor profundidad de penetración en el mismo y la posibilidad de obtener imágenes con mayor resolución. Ver la figura 3.



*Figura 3. En esta representación esquemática, dos fotones en el infrarrojo son absorbidos por el tejido biológico de la neurona y éstos emiten fluorescencia (luz) de color verde agua, la cual puede detectarse con un microscopio convencional. Entre las ventajas que ofrece esta técnica se encuentran un menor riesgo de dañar la muestra a estudiar.*

Por otra parte, la polimerización de dos fotones (2PP por sus siglas en inglés) es una

tecnología actual que también aprovecha la absorción de dos fotones [Saldaña López et al., 2020]. En la 2PP se inicia la síntesis de materiales poliméricos<sup>2</sup> después de que una molécula aumenta su energía por absorción simultánea de dos fotones. En esta técnica, las propiedades de un material cambian solamente en la región localizada donde se da la absorción de luz; dichas regiones son volúmenes bastante pequeños, del orden de los femtolitros (un femtolitro es la milmillonésima parte de la millonésima parte de un litro), como se mencionó en la sección anterior. La 2PP ha permitido avanzar en tecnologías relacionadas tanto con la fabricación de materiales como aplicaciones en la electrónica.

En la UAM-Iztapalapa contamos con un láser lo suficientemente intenso como para explorar los fenómenos no lineales [Mendoza-Luna et al., 2019]. En él estudiamos diversas propiedades de la materia, siendo una de ellas la probabilidad de que una sustancia en particular pueda absorber dos fotones (la ya nombrada sección eficaz de absorción de dos fotones). Una de las sustancias que hemos investigado es conocida como IR780 [Guarín et al., 2021, Alves et al., 2018], a veces también llamado heptametina cianina. Nos encontramos realizando estudios similares en otras sustancias.

El IR780 es una molécula orgánica que se usa normalmente como colorante. Esta molécula ha sido investigada como auxiliar en la terapia fotodinámica y fototérmica para el tratamiento del cáncer [Wang et al., 2016]. Además, esta molécula tiene otros usos en la investigación científica, pero ellos no serán explorados en este do-

<sup>2</sup> Un polímero es una cadena formada por moléculas (llamadas monómeros) que están unidas entre sí; el proceso de polimerización consiste en cambiar la estructura del polímero para poder unir nuevos eslabones haciendo que la cadena original cambie y se transforme en una más grande y con nuevas propiedades.

cumento. Después del trabajo experimental y de algunos cálculos en Yoltla, el clúster de cómputo de la UAM, concluimos que el IR780 cuenta con una gran habilidad para absorber dos fotones cuando éstos se encuentran en la parte infrarroja del espectro (específicamente en 875 nm). Esto tiene posibles implicaciones como un material útil para las aplicaciones discutidas anteriormente.

### **María Goeppert-Mayer después de la absorción de dos fotones**

El descubrimiento de la absorción de dos fotones fue el primer trabajo científico de María de Goeppert-Mayer (ver figura 4) y el producto de su investigación doctoral. Durante el periodo en que ella estaba inmersa en este trabajo, contrajo matrimonio con Joseph Edward Mayer, con quien decidió migrar a Estados Unidos, en donde trabajó como docente e investigadora en diversos establecimientos científicos [Nobel Prize Outreach, 2022]; parte de sus actividades en este tiempo comprendieron su trabajo en el proyecto Manhattan, que condujo a la creación de la bomba atómica [Grzybowski y Pietrzak, 2013].



*Figura 4. María Goeppert-Mayer. Imagen del dominio público tomada de [Nobel Prize Outreach, 2022].*

En 1946, María Goeppert-Mayer y su esposo se establecieron en Chicago, donde ella desarrolló algunos trabajos teóricos

que le valdrían el Premio Nobel de Física de 1963; ella es, además, la segunda mujer en obtener esta distinción (Marie Curie fue la primera, Donna Strickland y Andrea Ghez son la tercera y la cuarta, respectivamente). Tristemente, después de una carrera científica llena de logros y descubrimientos, María Goeppert-Mayer falleció el 20 de febrero de 1972.

### **Epílogo y conclusiones**

En este breve artículo hemos expuesto una serie de ideas que conciernen a la física moderna y contemporánea: desde el concepto de espectro de una sustancia hasta las ideas básicas detrás de la moderna óptica no lineal.

La absorción de dos fotones es un fenómeno no lineal descubierto tempranamente en el marco de la mecánica cuántica, de hecho, tres décadas antes de la creación del primer láser. Hemos aprendido el principio físico detrás de este fenómeno y hemos explorado brevemente sus aplicaciones, las cuales siguen siendo materia de investigación y desarrollo tecnológico. Es de esperar que en el futuro cercano se encuentren nuevos materiales con propiedades favorables de absorción de dos fotones, así como nuevas aplicaciones del mismo fenómeno. En la UAM-Iztapalapa continuamos con nuestros estudios sobre absorción de dos fotones, en particular, y sobre fenómenos no lineales, en general, hasta donde nos lo permite la actual situación de pandemia.

A lo largo de este artículo se ha expuesto una idea científica, la absorción de dos fotones, pero también se ha hablado de la científica detrás de este descubrimiento. Este escrito refuta la concepción de que la ciencia es una actividad fría y desapasionada: antes, al contrario, hemos demostrado que la ciencia es una actividad



humana y que, como tal, no es ajena a los vicios y problemas que aquejan a éstas.

La vida de María Goeppert-Mayer refleja una situación histórica complicada para las mujeres en la ciencia, en la que no era sencillo para una mujer tratar de incursionar en el mundo de la ciencia e, incluso, cuando ella ya se encontraba inmersa en ese mundo, usualmente se le marginaba a tareas o temas de importancia secundaria o empleos sin remuneración [Nobel Prize Outreach, 2022, Grzybowski y Pietrzak, 2013]. María Goeppert-Mayer contó con el apoyo decisivo de sus padres para impulsar su formación, y es posible especular que no habría conseguido sus logros sin su apoyo. En México ha habido y todavía existen mujeres que no explotan su potencial debido a la falta de apoyo y oportunidades, lo cual es una gran pérdida personal y para la humanidad en su conjunto.

Incluso en la actualidad, la cantidad de mujeres dedicadas a la ciencia es muy baja comparada con la de los hombres: solo un 30% del total de la participación en las carreras de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas a nivel mundial [UNESCO, 2021]. La discusión sobre por qué las mujeres no siguen carreras de ciencia y tecnología es muy amplia y sería imposible abordarla en algunos renglones. Sin embargo, el ejemplo de grandes científicas como María Goeppert-Mayer refleja la capacidad y logros que las mujeres pueden obtener en las ciencias, a pesar de los prejuicios y la discriminación que todavía existen, incluso en los círculos intelectuales y científicos.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana las facilidades para realizar este trabajo, así como a LANCAD por otorgar recursos de cómpu-

to (Yoltla) a través del proyecto 26-2022. LGML y CAGD agradecen al CONACYT el financiamiento a través del programa Investigadores por México (antes Cátedras CONACYT).

### Referencias

[Aboites, 1991] Aboites, V. (1991). El láser. Fondo de Cultura Económica, primera edición.

[Alves et al., 2018] Alves, C. G., Lima-Sousa, R., de Melo-Diogo, D., Louro, R. O., and Correia, I. J. (2018). IR780 based nanomaterials for cancer imaging and photothermal, photodynamic and combinatorial therapies. *International Journal of Pharmaceutics*, 542(1-2):164–175.

[Beauty of Science, 2016] Beauty of Science (2016). Envisioning chemistry: Elemental burning. <https://vimeo.com/186409285>. Visto: 15-02-2022.

[Beauty of Science, 2017] Beauty of Science (2017). Envisioning chemistry: Elemental burning II. <https://youtu.be/qJauE-3QYHgw>. Visto: 15-02-2022.

[Cetto, 1987] Cetto, A. M. (1987). La luz en la naturaleza y en el laboratorio. Fondo de Cultura Económica, primera edición.

[Flores Valdés, 1997] Flores Valdés, J. (1997). I: Niels Bohr: Puente entre la física clásica y la moderna. En Niels Bohr: Científico, filósofo, humanista. Fondo de Cultura Económica, segunda edición.

[Grzybowski y Pietrzak, 2013] Grzybowski, A. and Pietrzak, K. (2013). Maria Goeppert-Mayer (1906-1972): two-photon effect on dermatology. *Clinics in dermatology*, 31(2):221–225.

[Guarín et al., 2021] Guarín, C. A., Mendoza-Luna, L. G., Haro-Poniatowski, E., and Hernández-Pozos, J. L. (2021). Two-photon absorption spectrum and characterization of the upper electronic states of the dye IR780. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 249:119291.

[Ibarra Villalón et al., 2018] Ibarra Villalón, H. E., Pottiez, O., and Gómez-Vieyra, A. (2018). El camino hacia la luz láser. *Revista Mexicana de Física E*, 64 (Diciembre):100–107.

[Kaiser y Garrett, 1961] Kaiser, W. and Garrett, C. G. (1961). Two-photon excitation in CaF<sub>2</sub>: Eu<sup>2+</sup>. *Physical Review Letters*, 7(6):229–231.

[Mendoza-Luna et al., 2019] Mendoza-Luna, L. G., Guarín, C. A., Haro, E., and Hernández, J. L. (2019). El nuevo sistema láser de pulsos ultracortos de la UAM Iztapalapa. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, 33(1):31–41.

[MIT OCW, 2013] MIT OCW (2013). Elements on fire — MIT chemistry behind the magic. [https://youtu.be/\\_erP4SBOXRI](https://youtu.be/_erP4SBOXRI). Visto: 15-02-2022.

[Nobel Prize Outreach, 2022] Nobel Prize Outreach (2022). Maria Goeppert Mayer – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize

Outreach AB 2022. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1963/mayer/biographical>. Visto: 14-02-2022.

[O'Donoghue, 2019] O'Donoghue, J. (2019). Light speed – fast, but slow. <https://twitter.com/physicsJ/status/1178674298141020161?s=20>. Visto: 22-12-2021.

[Saldaña López et al., 2020] Saldaña López, A., Maibohm, C., Silvestre, O. F., and Nieder, J. B. (2020). Polimerización de dos fotones, una tecnología interdisciplinar: de la innovación en investigación biomédica a los dispositivos fotónicos integrados. *Revista Española de Física*, 34(2):23–28.

[UNESCO, 2021] UNESCO (2021). Just 30% of the world's researchers are women. What's the situation in your country? <https://en.unesco.org/news/just-30-world'sresearchers-are-women-whats-situation-your-country>. Visto: 17-02-2022.

[Wang et al., 2016] Wang, K., Zhang, Y., Wang, J., Yuan, A., Sun, M., Wu, J., and Hu, Y. (2016). Self-assembled IR780-loaded transferrin nanoparticles as an imaging, targeting and PDT/PTT agent for cancer therapy. *Scientific Reports*, 6(March):1–11.