

El efecto túnel: un fenómeno extraño pero real con tecnología premiada por el Nobel

Marco Polo Jiménez Segura¹, Jesús Hernández Trujillo^{1}*

¹Facultad de Química, UNAM.

*Área de estudio: Química computacional *Contacto: jesusht@unam.mx

Resumen

En esta breve semblanza se presenta una accesible explicación sobre el efecto túnel y los premios Nobel que, por su importancia, han sido otorgados en este tema. Aunque se trata de un fenómeno que se explica desde la física con los métodos de la mecánica cuántica, este tiene grandes implicaciones en química, biología y ciencia de materiales, por lo que representa una oportunidad para ilustrar la gran conexión que hay entre la física y otras disciplinas, en particular con la química.

Palabras clave: Premio Nobel de Física 2025, efecto túnel, junta Josephson, microscopio de efecto túnel, efecto túnel en la química.

Abstract

This brief overview presents an accessible explanation about the tunnel effect and the Nobel Prizes that, due to their significance, have been awarded in this same field. Although it is a phenomenon explained by physics using the methods of quantum mechanics, it has major implications in chemistry, biology, and materials science, thus representing an excellent opportunity to illustrate the strong connection between physics and other disciplines, particularly chemistry.

Keywords: 2025 Nobel Prize in Physics, tunnel effect, Josephson junction, scanning tunneling microscope, tunnel effect in chemistry.

1. Introducción

Uno de los retos de la enseñanza de la mecánica cuántica en las etapas tempranas de la educación universitaria radica en la dificultad de establecer conexiones entre los conceptos teóricos que sirven para entender fenómenos que ocurren a escala microscópica (del tamaño de átomos, moléculas y partículas subatómicas) y las observaciones del día a

día de la experiencia cotidiana. A su vez, el abordaje histórico de los conceptos cuánticos y sus protagonistas ha sido una herramienta didáctica valiosa para acercar a los estudiantes a la complejidad de esas entidades tan pequeñas. (Garritz 2014). El efecto túnel es uno de esos casos, y es tan importante que investigaciones en este campo han valido tres premios Nobel a lo largo del tiempo. El

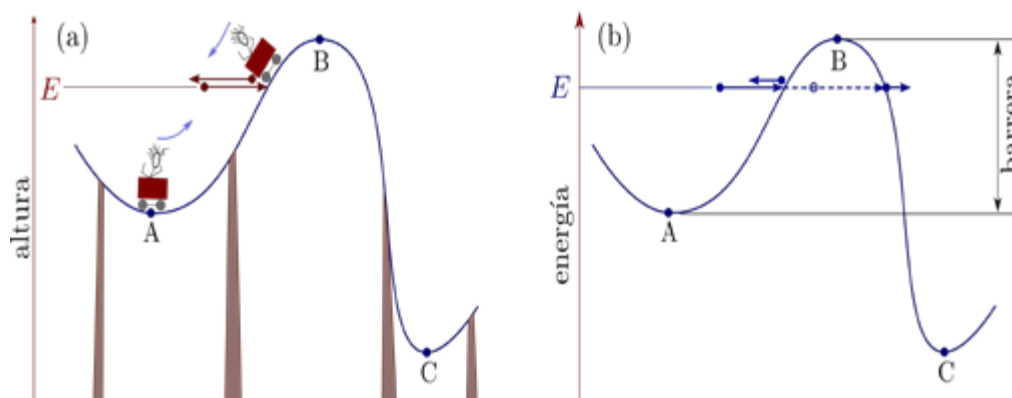


Fig. 1 (a) Movimiento de los vagones en la montaña rusa. La energía potencial de los vagones es directamente proporcional a la altura de la montaña rusa. Las flechas rojas señalan que el vagón no llega al punto B y regresa a A cuando su energía, es insuficiente para pasar la barrera. **(b)** En el caso cuántico, cuando una partícula no tiene la energía necesaria para remontar la barrera, puede regresar al punto A y también hay una probabilidad diferente de cero de que pase al punto C (flechas azules).

presente artículo de divulgación busca servir como material de lectura introductorio para estudiantes de carreras relacionadas con la química con el fin de motivar la curiosidad científica para profundizar en la comprensión de este tema y de sus posibles aplicaciones.

2. ¿Qué es el efecto túnel?

El efecto túnel es un fenómeno de naturaleza microscópica que se explica mediante la mecánica cuántica. Cuando se habla de efecto túnel, se dice que es posible que un objeto atravesase una barrera de energía potencial a pesar de que no cuente con la energía suficiente para ello (Atkins et al. 2006; Lincoln 2021). Esta afirmación contradice lo que nuestra experiencia cotidiana dicta, pero debe tomarse en cuenta que a escala microscópica los fenómenos no transcurren de manera similar a como lo hacen a escala macroscópica (Hipps and Scudiero 2005). Para ilustrar lo anterior, considera el siguiente ejemplo. Supón que un grupo de amigos se encuentra en un parque de diversiones y se sube a una montaña rusa (**Fig. 1 (a)**). En este ejemplo macroscópico, la barrera energética se debe a la fuerza de gravedad, por lo que la energía potencial de los vagones depende de la altura a la que ellos se encuentren y su movimiento se estudia con la segunda ley de

Newton. Para que el vagón pueda llegar de la posición más baja A al máximo en B y de allí pasar por el mínimo en C, éste debe tener la energía suficiente para realizar ese recorrido. De otro modo, si el valor de la energía, en la **Fig. 1 (a)**, es menor que en el punto B, éste no podría superar la barrera y regresaría al punto A. En contraste, a nivel microscópico (**Fig. 1 (b)**), el movimiento de las partículas se rige por la ecuación de Schrödinger a través de la llamada función de onda (Atkins et al. 2006). Debido a la dualidad onda-partícula (pues la luz y la materia exhiben un comportamiento común a escala microscópica), existe una probabilidad diferente de cero de que una partícula pase de un lado a otro de una barrera energética, aunque su energía sea inferior a ésta (Bell 1980; Schreiner 2020). Este comportamiento es similar al de una onda que puede reflejarse, pero también transmitirse al pasar de un medio material a otro. Comparando con la montaña rusa, sería como si los vagones pasaran del punto A al C aunque no tuvieran suficiente energía para hacerlo.

El efecto túnel es muy importante en química, física, biología y ciencia de materiales. Esto se sabe debido a la gran cantidad de evidencia experimental que confirma su participación en una diversidad de procesos. Por ejemplo, en la desintegración radiactiva de un núcleo atómico, se forma una partícula alfa (la cual

consiste en dos protones y dos neutrones) que se libera por efecto túnel a través de una barrera energética (Tipler and Mosca 2005; Alonso and Finn 1992). En biología, muchas reacciones de transferencia electrónica entre proteínas mediadas por cofactores (por ejemplo, citocromos y flavinas) involucran al efecto túnel (Atkins et al. 2006; Meisner and Kästner 2016).

3. El efecto Josephson y los premios Nobel de 1973

Se ha otorgado en tres ocasiones el premio Nobel en Física a científicos por sus contribuciones en el estudio del efecto túnel. En 1973, se dio este reconocimiento a Leo Esaki, Ivar Giaever, y Brian D. Josephson ("Nobel Prize in Physics 1973,"). A los dos primeros por sus descubrimientos sobre el efecto túnel en semiconductores y superconductores, respectivamente. Mientras que a Brian D. Josephson se le otorgó por sus predicciones teóricas sobre una supercorriente que atraviesa una barrera.

En la teoría conocida como BCS (por John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer), en un superconductor convencional los electrones superan la repulsión coulombica (ésta debida a que ambos tienen la misma carga). Esto ocurre de la siguiente manera: conforme un primer electrón avanza por el material, su carga negativa atrae hacia sí ligeramente a los iones positivos de la red cristalina. Esto genera una deformación en la red. Esta deformación crea una zona local con mayor concentración de carga positiva. La zona de carga positiva termina atrayendo a un segundo electrón que se encuentre cerca. A este mecanismo, mediado por las vibraciones de la red (fonones), se le conoce como acoplamiento electrón-fonón.

Esto permite que los electrones formen pares y fluyan sin resistencia eléctrica. A estos se les llama pares de Cooper. La realidad es que a estos pares se les suman muchos otros más y forman un estado cuántico colectivo que da lugar a la superconductividad (Tinkham 2004).

Cuando dos materiales superconductores se sitúan separados por un aislante delgado, típicamente entre 1 y 3 nanómetros (Zeng et al. 2015), los pares de Cooper pueden atravesar el aislante mediante el efecto túnel. Con esto, nos referimos a que los pares pasan la barrera causada por el aislante, aunque ellos no tengan energía suficiente para hacerlo según la física clásica. Ese paso de corriente superconductora sin voltaje se conoce como el efecto Josephson. Existen tres tipos principales de juntas Josephson que son mostradas en la **Fig. 2**.

Como mencionamos, los pares de Cooper pueden atravesar una barrera aislante entre dos materiales superconductores. La corriente que fluye a través de la unión depende de la diferencia de fase entre los dos superconductores. Hasta principios de los años ochenta, esa fase se trataba como una variable clásica: se creía que las juntas Josephson se comportaban como dispositivos eléctricos regidos por ecuaciones que no manifestaban un carácter cuántico.

Ahora, tratemos de entender a qué se debe el efecto Josephson y la importancia de la fase. Imaginemos que cada electrón dentro de los materiales trae consigo un reloj de manecillas imaginario. A medida que avanza cada uno de los electrones, las manecillas del reloj avanzan también. El ángulo de la dirección en la que

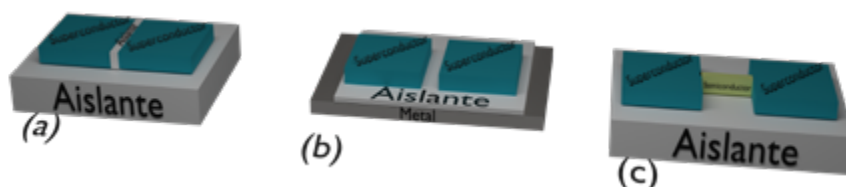


Fig. 2 Juntas Josephson (a) S-I-S Superconductor- Aislante-Superconductor (b) S-N-S Superconductor-Metal normal-Superconductor, y (c) S-Sm-S Superconductor-Semiconductor-Superconductor.

apunta cada manecilla en un momento y lugar específico es conocido como la “fase”. En un material en el estado normal (se le llama normal cuando no hay superconductividad), las manecillas de cada electrón giran de forma independiente en diferentes direcciones. Cuando los electrones se acoplan y forman los pares de Cooper, las fases de todos los electrones involucrados giran en la misma dirección. A esta sincronización de las fases se le conoce como la “fase superconductora”. Cuando colocamos dos superconductores separados por una pequeña barrera aislante, formamos la junta Josephson. Cada superconductor tiene de su lado su propia fase, en la que las manecillas apuntan en su propia dirección, por lo que existe una diferencia de fase. Resulta que la fase de un superconductor percibe que está desfasado de la fase del otro superconductor y esto provoca que los electrones brinquen de un lado al otro para tratar de sincronizar la fase, provocando una corriente túnel, llamada corriente Josephson, a través del material aislante. Esta analogía de la fase está basada en las explicaciones de Feynman que se abordan con más detalle en Feynman 2006; Vinokur et al. 2008.

Hay dos consecuencias notables del efecto Josephson. La primera se refiere a la corriente sin voltaje o efecto Josephson DC. Si no hay diferencia de potencial entre los dos superconductores, puede circular una corriente constante llamada corriente superconductora sin diferencia de voltaje. La segunda se conoce como oscilaciones con voltaje o efecto Josephson AC. Esto es, si se aplica un voltaje, la corriente que pasa a través de la unión oscila con una frecuencia proporcional al voltaje.

4. Cuantización macroscópica y la tecnología del Nobel

Como mencionamos en la sección 3, La corriente que pasa de un superconductor a otro se ve motivada por una diferencia de fase de los superconductores. Hasta principios de los años ochenta, esa fase se trataba como una variable clásica: se creía que las juntas

Josephson se comportaban como dispositivos eléctricos regidos por ecuaciones que no manifestaban un carácter cuántico.

En 1985 J. Clarke, M. H. Devoret y J. M. Martinis observaron por medio de una serie de experimentos que la diferencia de fase macroscópica no es simplemente un parámetro clásico, sino una variable cuantizada (Martinis et al. 1985; Devoret et al. 1985; Clarke and Schön 1986). La fase es una propiedad física medible, ya que se relaciona con la corriente superconductora. Clarke, Devoret y Martinis construyeron circuitos Josephson con muy bajo ruido, capaces de operar a temperaturas de pocos milikelvin. En estos sistemas, la fase puede comportarse como una “partícula” atrapada en un potencial análogo a un electrón confinado en un átomo artificial (Martinis et al. 2020). Este descubrimiento prueba que una variable eléctrica colectiva de un circuito puede exhibir un comportamiento puramente cuántico.

En los experimentos de Clarke, Devoret y Martinis, los investigadores observaron dos fenómenos fundamentales: túnel cuántico macroscópico y cuantización de niveles de energía. Esto se confirmó tras irradiar con microondas y observar resonancias entre esos niveles. Estos resultados demostraron que un circuito eléctrico macroscópico puede comportarse como un átomo cuántico.

La sensibilidad cuántica que ofrecen los circuitos basados en juntas Josephson permite desarrollar los SQUID (superconducting quantum interference device), estos sirven como bases para magnetómetros muy sensibles que incluso son capaces de detectar la actividad magnética del cerebro o del corazón, y, en química, para estudiar los momentos magnéticos de materiales.

En 2025 se premió el trabajo de John Clarke, Michel Henri Devoret y John Matthew Martinis. Además de su importancia por la demostración de la cuantización a nivel macroscópico, la contribución de estos científicos tiene grandes

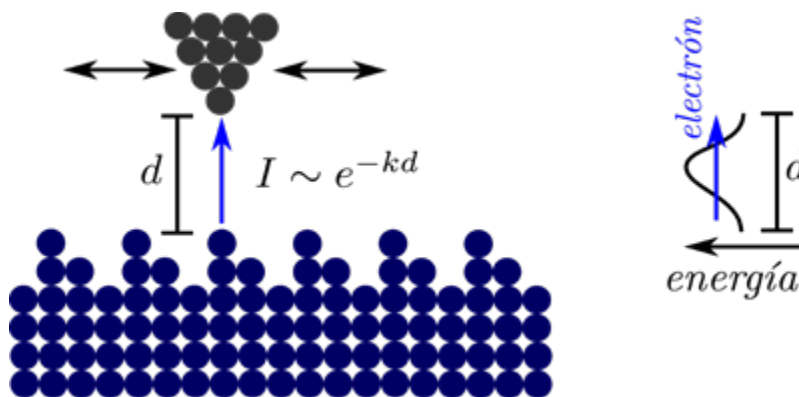


Fig. 3 Esquema de microscopía de efecto túnel (STM).

aplicaciones potenciales. Citando textualmente a la página del Premio Nobel: El Premio Nobel de Física del 2025 *“ha brindado oportunidades para el desarrollo de la próxima generación de tecnología cuántica, incluyendo la criptografía cuántica, las computadoras cuánticas y los sensores cuánticos”* (“Nobel Prize in Physics 2025,” n.d.).

5. Aplicaciones en química y materiales

La evidencia experimental muestra que el paso de reactivos a productos en una reacción química a través de un estado de transición en ocasiones se ve afectado por el efecto túnel (Bell 1980; Meisner and Kästner 2016; Schreiner 2020). Al usar la **Fig. 1 (b)** para representar a la curva de energía potencial como función de la coordenada de reacción, A y C corresponden a los reactivos y productos, respectivamente, y B el estado de transición. Como el efecto túnel es muy sensible al valor de la masa de las partículas involucradas en penetrar una barrera (entre mayor sea la masa, menor es el efecto túnel), la rapidez de una reacción de ruptura o formación de enlace químico puede cambiar por la sustitución de un isótopo por otro. Esto se conoce como efecto isotópico, el cual queda manifiesto cuando se sustituye un átomo de hidrógeno por deuterio y disminuye la velocidad de reacción (Sprague 1977). Los ejemplos van desde reacciones de abstracción de hidrógeno por radicales metilo en cristales de acetonitrilo, hasta la de transferencia de hidrógeno en procesos de catálisis enzimática en sistemas biológicos (Klinman and Offenbacher 2018). Asimismo, el

efecto túnel provoca desviaciones de la ley de Arrhenius a bajas temperaturas, régimen en el que el efecto isotópico de átomos más allá del hidrógeno también puede ser detectado. Otros ejemplos de transformaciones químicas que involucran átomos pesados, como carbono o nitrógeno, son la automerización de ciclobutadieno y la inversión de amoníaco, respectivamente (Meisner and Kästner 2016; Halpern et al. 2007). Asimismo, recientemente se ha sugerido que el efecto túnel puede utilizarse para dirigir los productos de una reacción química, como alternativa al control cinético o al termodinámico (Schleif and Nandi 2025).

En el contexto de ciencia de materiales, el efecto túnel se utiliza para caracterizar materiales conductores e incluso para manipular átomos a escala nanométrica (Eigler and Schweizer 1990). En 1986 (“Nobel Prize in Physics 1986,” n.d.), se otorgó el premio Nobel a Gerd Binnig y Heinrich Rohrer por el diseño del microscopio de efecto túnel. Esta técnica constituye una aplicación experimental del efecto túnel (Hippes and Scudiero 2005). Al aplicar una diferencia de potencial entre una punta conductora afilada que se mueve sobre la superficie de un material conductor, se genera una corriente eléctrica entre ambas (Chen 2008). El paso de los electrones entre la punta y la muestra ocurre a través de una barrera energética con una probabilidad que decae exponencialmente con la distancia entre ellas, por lo que la corriente generada es sensible a la forma de la superficie (**Fig. 3**). Por esta razón, la microscopía de efecto

túnel sirve para obtener la topografía de la superficie. Las aplicaciones de esta técnica son numerosas. Por ejemplo, en el estudio y diseño de convertidores catalíticos de automóviles y para mover moléculas en una superficie.

En un contexto más amplio, recientemente otros científicos han recibido premios Nobel por contribuciones asociadas a la mecánica cuántica, tales como el de física de 2022, relacionado con el entrecruzamiento cuántico y la teoría de la información, y el de química en 2023 por el descubrimiento y síntesis de puntos cuánticos, los cuales son relevantes en el desarrollo de materiales ópticos como los LEDs.

Un ejemplo de aplicación del efecto túnel en la vida cotidiana es la memoria flash utilizada en teléfonos y computadoras. En estos dispositivos, al aplicar un campo eléctrico, los electrones en un transistor pueden pasar entre componentes, mediante el efecto túnel a través de una delgada capa aislante (principalmente de SiO₂) para almacenar información. (Liu 2022).

6. Conclusiones

Los ejemplos anteriores son casos en que se manifiesta el efecto túnel, tanto a nivel microscópico como macroscópico. Se trata de un fenómeno que se explica con la mecánica cuántica, cuyas repercusiones científicas y tecnológicas han valido tres premios Nobel a lo largo de los años. Estas investigaciones y otras en el área de la mecánica cuántica han tenido gran relevancia en el desarrollo tecnológico y, por lo tanto, en nuestra vida cotidiana, aunque tal vez no seamos conscientes de ello. Este impacto quedó de manifiesto cuando la Organización de las Naciones Unidas conmemoró el 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas.

Agradecimientos

Agradecemos a Felipe Cruz García, Kira Padilla Martínez y Héctor García Ortega sus comentarios y sugerencias durante la elaboración de esta semblanza.

Referencias

1. Alonso, M.; Finn, E. J. *Física*. Addison-Wesley Iberoamericana, 1992.
2. Atkins, P.; de Paula, J.; Keeler, J. *Atkins' Physical Chemistry*. 8th ed. Oxford University Press: 2006.
3. Bell, R. P. *The Tunnel Effect in Chemistry*. Chapman; Hall, 1980.
4. Chen, C. J. *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*. Second. Oxford University Press, 2008.
5. Clarke, J.; Schön, G. Macroscopic Quantum Phenomena in Josephson Elements, *Europhys. News* **1986**, 17, 94–96. <https://doi.org/10.1051/epn/19861707094>.
6. Devoret, M. H.; Martinis, J. M.; Clarke, J. Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling Out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction, *Phys. Rev. Lett.* **1985**, 55, 1908–1911. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1908>.
7. Eigler, D. M.; Schweizer, E. K. Positioning Single Atoms with a Scanning Tunneling Microscope, *Nature*, **1990**, 344, 524–526. <https://doi.org/10.1038/344524a0>.
8. Feynman, R. P. *The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton University Press, 2006.
9. Garritz, A. Historia de La Química Cuántica, *Educación Química* **2014**, 25, 170–175. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(14\)70555-5](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(14)70555-5).
10. Halpern, A. M.; Ramachandran, B. R.; Glendening, E. D. The Inversion Potential of Ammonia: An Intrinsic Reaction Coordinate Calculation for Student Investigation, *J. Chem. Educ.* **2007**, 84, 1067. <https://doi.org/10.1021/ed084p1067>.
11. Hipps, K. W.; Scudiero, L. Electron Tunneling, a Quantum Probe for the Quantum World of Nanotechnology, *J. Chem. Educ.* **2005**, 82, 704–711. <https://doi.org/10.1021/ed082p704>.
12. Klinman, J. P.; Offenbacher, A. R. Understanding Biological Hydrogen Transfer Through the Lens of Temperature Dependent Kinetic Isotope Effects, *Acc. Chem. Res.* **2018**, 51, 1966–1974. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00226>.
13. Lincoln, J. Quantum Tunneling Experiments with Tunnel Diodes. Short survey. *Physics Teacher* **2021**, 59, 76–77. <https://doi.org/10.1119/10.0003028>.
14. Liu, Z. T. Flash Memory and NAND. In *Advanced Driver Assistance Systems and Autonomous Vehicles: From Fundamentals to Applications*, Li, Y.; Shi, H. Ed.; Springer Nature Singapore, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5053-7_5.

15. Martinis, John M., Michel H. Devoret, and John Clarke. Energy-Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction. *Phys. Rev. Lett.* **1985**, 55, 1543–1546. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1543>.
16. Martinis, J. M.; Devoret, M. H.; Clarke, J. Quantum Josephson Junction Circuits and the Dawn of Artificial Atoms. *Nat. Phys.* **2020**, 16, 234–237. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0829-5>.
17. Meisner, J.; Kästner, J. Atom Tunneling in Chemistry, *Angew. Chem. Int. Edn.*, 2016, 55, 5400–5413. <https://doi.org/10.1002/anie.201511028>.
18. Nobel Prize in Physics 1973. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1973/summary/> (accessed October 18, 2025).
19. Nobel Prize in Physics 1986. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1986/summary/> (accessed October 18, 2025).
20. Nobel Prize in Physics 2025. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/press-release/> (accessed October 18, 2025).
21. Schleif, T.; and Nandi, A. Role of Quantum Tunneling in Synthetic Organic Chemistry, *Eur. J. Org. Chem.* 2025, 28, e202500656. <https://doi.org/10.1002/ejoc.202500656>.
22. Schreiner, P. R. “Quantum Mechanical Tunneling Is Essential to Understanding Chemical Reactivity, *Trends Chem*, **2020**, 2, 980–989. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2020.08.006>.
23. Sprague, E. D. Deuterium Isotope Effect on Hydrogen Atom Abstraction by Methyl Radicals in Acetonitrile at 77 K. Evidence for Tunneling. *J. Phys. Chem.* **1977**, 81, 516–520. <https://doi.org/10.1021/j100521a005>.
24. Tinkham, M. *Introduction to Superconductivity*; 2nd. Ed. Dover Publications, 2004.
25. Tipler, P. A., and G. Mosca. *Física Para La Ciencia y La Tecnología*. 5th. Ed., Vol. 2. Reverté, 2005.
26. Vinokur, V. M.; Baturina, T. I.; Fistul, M. V.; Mironov, A. Y.; Baklanov, M. R.; Strunk, Ch. Superinsulator and Quantum Synchronization, *Nature* **2008**, 452, 613–615. <https://doi.org/10.1038/nature06837>.
27. Zeng, L. J.; Nik, S.; Greibe, T.; et al. Direct Observation of the Thickness Distribution of Ultra Thin AlO_x Barriers in Al/AlO_x/Al Josephson Junctions. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2015**, 48, 395308. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/39/395308>.