Integración de tecnologías Arduino e impresión 3D en una práctica de laboratorio de conductividad térmica

ISSN 1870-9095

L. Pérez-Acosta[1], B. Villamán-Díaz[2], D. Peña-Ferreira[1], J. Blanco[1], I. Clavel-Hernández[1]

[1]Departamento de Educación, Universidad ISA, Ave Presidente Antonio Guzmán, Km 5 ½, La Herradura, Santiago de los Caballeros, República Dominicana, CP 51000.

[2]Liceo Científico Dr Miguel Canela Lázaro, Carretera Manolo Tavárez Justo, La Ceiba, Villa Tapia, República Dominicana, CP 34000.

E-mail: lperez@isa.edu.do

(Recibido el 3 de febrero de 2025, aceptado el 30 de marzo de 2025)

Resumen

La implementación de tecnologías novedosas en la enseñanza de las ciencias ha transformado el trabajo de laboratorio. Lo anterior constituye el foco de este trabajo, donde se presenta una propuesta de diseño experimental para una práctica de conductividad térmica. Para ello, se introducen la impresión 3D y la tecnología Arduino en la fabricación de partes y piezas, y en la adquisición de datos en tiempo real, respectivamente. De esta forma, se construyó una estación de medición de conductividad térmica. Para validar la propuesta, se fabricaron dos muestras, una de yeso y otra de ABS, y se realizaron mediciones de conductividad térmica, κ. Los valores medidos para ambas muestras, mostraron una excelente concordancia con los reportados en la literatura, obteniendo $\kappa = 0.249 \pm 0.015\ W/mK$ para la muestra de yeso, y $\kappa = 0.203 \pm 0.007\ W/mK$ para la de ABS. Además de ser una propuesta relativamente modesta en costos y fácil de implementar, la misma constituye una experiencia educativa enriquecedora para los estudiantes, por el carácter activo que estos le confieren al proceso de enseñanza-aprendizaje.

Palabras clave: Arduino, impresión 3D, conductividad térmica.

Abstract

The integration of new technologies into science education has revolutionized laboratory work, which is the focus of this study. This work presents an experimental design proposal for a thermal conductivity lab exercise. To achieve this, 3D printing and Arduino technology were employed for the fabrication of components and real-time data acquisition, respectively. This approach enabled the construction of a thermal conductivity measurement station. To validate the proposal two samples were prepared, one made of gypsum and the other of ABS, and thermal conductivity measurements, κ, were performed. The measured values for both samples showed excellent agreement with those reported in the literature, with $\kappa = 0.249 \pm 0.015\ W/mK$ for the gypsum sample and $\kappa = 0.203 \pm 0.007\ W/mK$ for the ABS sample. In addition to being a cost-effective and easily implementable approach, this proposal offers an enriching educational experience for students by actively engaging them in the teaching-learning process.

Keywords: Arduino, 3D printing, thermal conductivity.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la implementación de tecnologías novedosas en la enseñanza de las ciencias ha transformado el trabajo experimental. Entre estas tecnologías, podemos mencionar la impresión 3D y Arduino, las cuales han demostrado ser herramientas efectivas y motivadoras para la realización de experimentos en diversas áreas de la física [1]. A través de la impresión 3D, por ejemplo, podemos crear partes y piezas, así como prototipos personalizados de manera rápida y con costos reducidos, facilitando el montaje de experimentos para las mediciones de magnitudes físicas en diversos contextos. A su vez, Arduino es una alternativa relativamente modesta y fácil de implementar, además de útil por su capacidad de registrar datos en tiempo real, lo que resulta muy ventajoso en experimentos por la precisión de las medidas y su reproducibilidad [2].

La integración de estas tecnologías, al desarrollo de las prácticas de laboratorio, no solo permite superar las limitaciones de los equipos comerciales tradicionales, que suelen ser costosos y poco flexibles, sino que también abre nuevas posibilidades para el aprendizaje activo y la resolución de problemas en entornos educativos [3].

Por su lado, la enseñanza práctica de la conductividad térmica, enfrenta cierta complejidad al intentar explicar un fenómeno para nada simple. A esto se le debe sumar, que el montaje experimental precisa de equipamiento especializado y costoso, lo cual limita su accesibilidad [4]. Este problema se agudiza aún más en el contexto educativo actual

dominicano, donde se demanda una formación práctica más inclusiva y accesible.

La introducción de herramientas accesibles como Arduino y la impresión 3D podrían ofrecer una solución viable, al permitir el diseño de sistemas experimentales de bajo costo, acercándose a las funciones de los equipos profesionales. Esta sinergia entre Arduino e impresión 3D, no solo permite el acceso a herramientas avanzadas, sino que también promueve un enfoque interdisciplinario en el aprendizaje. Al integrar las tecnologías emergentes a las prácticas de física, los estudiantes aplican sus conocimientos sobre los principios de transferencia de calor, al mismo tiempo que desarrollan habilidades en programación, diseño asistido por computadora (CAD) y electrónica [3].

Teniendo en cuenta lo anterior, nos proponemos describir el diseño e implementación de una práctica de laboratorio que integra estas tecnologías para el estudio de la conductividad térmica. Se discutirán los componentes impresos en 3D, el sistema de adquisición de datos basado en Arduino y los procedimientos experimentales propuestos. Con esta contribución, se busca promover una experiencia educativa enriquecedora para los estudiantes, por el carácter activo que estos recursos didácticos le confieren, al proceso de enseñanza-aprendizaje.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Montaje experimental

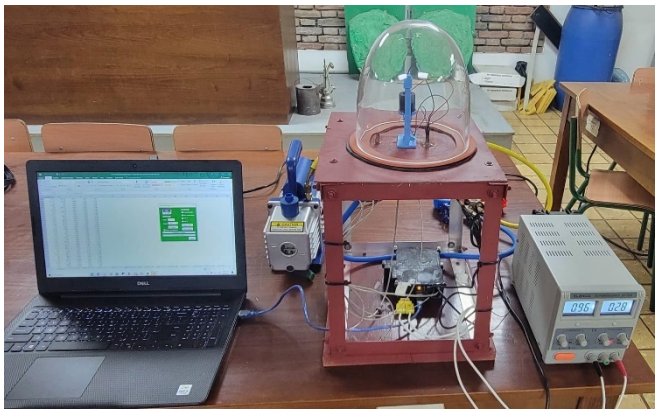

FIGURA 1. Montaje experimental utilizado para medir conductividad térmica.

Es importante comenzar diciendo que todo lo descrito a partir de aquí fue desarrollado por estudiantes de la carrera de Licenciatura en Física orientada a la Educación Secundaria, con el objetivo de realizar mediciones de conductividad térmica con los recursos disponibles en el laboratorio y ante la carencia de equipamiento profesional. La Fig. 1 muestra el montaje experimental utilizado. Para las mediciones de temperatura se utilizaron dos termopares tipo K, los cuales operan en un rango entre 0 y 1100 °C, con una apreciación de 0.1 °C. Se usó un módulo MAX6675, el cual convierte la señal de voltaje de los termopares en datos digitales. Como agente disipador de calor, se usó una resistencia eléctrica, fabricada de una aleación de Níquel-Cromo, la cual fue conectada en serie a una fuente de corriente DC Elenco XP-752A. Para medir la potencia disipada por la resistencia, se realizaron mediciones de voltaje e intensidad de corriente eléctrica, usando un sensor de voltaje FZ0430 y otro de corriente ACS712. El sensor de voltaje posee un rango de medición de entre 0 y 30.00 V, con una apreciación de 0.01 V. Por su parte, el sensor de corriente opera en un rango de medición de ±30.00 A y tiene una apreciación de 0.01 A. Todos los componentes descritos anteriormente se conectaron convenientemente a una placa de Arduino Uno. La recolección de los datos en tiempo real se programó en el entorno Arduino IDE.

Para albergar la placa Arduino Uno, los sensores de voltaje y corriente, la protoboard y los cables de conexión, se diseñó un contenedor y su tapa, usando el software SketchUp Pro 2018 v18.0, la cual incluía compartimentos específicos y orificios de montaje para asegurar firmemente los componentes electrónicos y se imprimió en una impresora 3D Ender 3 Pro, como se muestra en la Fig.2 (a). A partir de la necesidad de fijar muestras cilíndricas con diferentes longitudes en la dirección del eje del cilindro, así como las puntas de los termopares para medir la temperatura en el interior y exterior de las muestras lo más acorde posible al modelo físico utilizado, se diseñó e imprimió un porta muestras que se ajustaba a dichas necesidades (ver Fig. 2 (b)). El porta muestras, junto con la resistencia y los termopares, fueron colocados en una campana de vidrio donde se realizó vacío usando una bomba de 2 etapas 5CFM LT-2.5B, alcanzando una presión en la cámara de hasta 5 Pa.

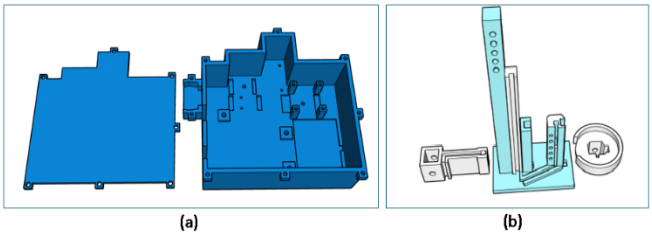

FIGURA 2. (a) Modelo en 3D de contenedor y tapa para albergar placas de circuitos, conductores y sensores. (b) Modelo en 3D del porta muestras.

B. Preparación de las muestras y mediciones

Las mediciones se realizaron en dos muestras, una de yeso, la cual denominaremos M1 en lo adelante, y otra de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), que designaremos por M2. Para la obtención de la muestra M1, se utilizó un molde diseñado e impreso en 3D, el cual se muestra en la Fig. 3(a). El mismo permitió obtener muestras cilíndricas con las siguientes dimensiones: hasta 28.00 mm de altura, un diámetro exterior de hasta 25.10 mm y un diámetro interior de hasta 14.42 mm. Para la mezcla se usaron 20.0 g de yeso en 7 ml de agua, removiendo constantemente para conseguir una mezcla homogénea y minimizar las burbujas de aire en su interior. Luego la mezcla se vertió en el molde y se dejó secar por 1 h a temperatura ambiente. Finalmente, se desmoldó y se concluyó el secado en un horno a 100 °C durante 30 min.

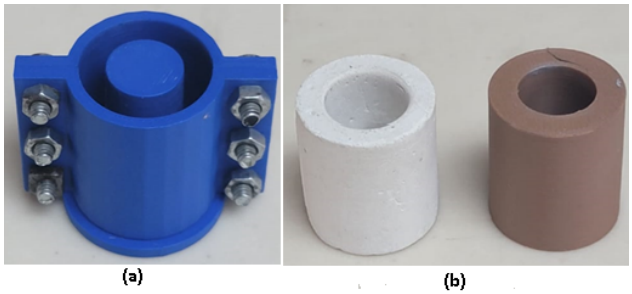

FIGURA 3. (a) Molde diseñado e impreso en 3D para la fabricación de la muestra de yeso. (b) Muestras de yeso y ABS.

Por otro lado, la muestra de ABS fue diseñada en SketchUp. Una vez completado el diseño, se procedió a la impresión de la muestra utilizando la impresora 3D, la cual se configuró para imprimir a una densidad del 100 %, para minimizar los poros y los espacios vacíos que pudieran afectar las mediciones de conductividad térmica.

Para las mediciones de conductividad térmica se usó la Ley de Fourier en coordenadas cilíndricas. Consideremos una muestra cilíndrica de radio interior y exterior r_1 y r_2, respectivamente, y longitud L, con un gradiente de temperatura que varía radialmente desde el centro hacia fuera.

La ley de Fourier, en su forma general, establece que el flujo de calor por conducción, q, en un material es proporcional al gradiente de temperatura, y se expresa matemáticamente como:

$$q = -\kappa \nabla T \,, \tag{1}$$

donde q es el vector densidad de flujo de calor (en W/m^2), κ es la conductividad térmica del material (en $W/m\,K$) y ∇T es el gradiente de temperatura (en K/m). En el caso de un flujo de calor radial en un cilindro, el gradiente de temperatura ∇T en coordenadas cilíndricas, r, θ, φ se simplifica, ya que solo consideramos la variación en la dirección radial, y queda expresado como:

$$\nabla T = \frac{dT}{dr}\hat{r}. \tag{2}$$

Sustituyendo (2) en (1), obtenemos la densidad de flujo de calor en la dirección radial:

$$q(r) = -\kappa \frac{dT}{dr}\hat{r}. \tag{3}$$

El flujo total de calor, Q, que atraviesa una superficie cilíndrica a una distancia radial r, será la densidad de flujo de calor por el área a través de la cual fluye el calor. El área de una superficie cilíndrica de radio r y longitud L es $A(r) = 2\pi r L$. Tomando en cuenta esto, y en un sistema en estado estacionario, la ecuación diferencial resultante para el flujo de calor en la dirección radial es:

$$q(r)A(r) = Q = -\kappa\, 2\pi r L\, \frac{dT}{dr}. \tag{4}$$

Para determinar cómo varía la temperatura con el radio, integramos la ecuación anterior. La integral de la expresión diferencial proporciona la relación entre las temperaturas en dos radios r_1 (radio interno) y r_2 (radio externo) del cilindro:

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = -\frac{Q}{2\pi\kappa L}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r}. \tag{5}$$

Resolviendo (5), obtenemos la expresión para la diferencia de temperatura entre los radios r_1 y r_2:

$$\Delta T = \frac{Q}{2\pi\kappa L}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right). \tag{6}$$

Asumiendo un sistema ideal donde la potencia eléctrica, P, disipada por una resistencia ubicada en el eje del cilindro se convierte completamente en calor por efecto Joule, y reescribiendo la ecuación (6) obtenemos:

$$P = \kappa\,\gamma, \tag{7}$$

donde

$$\gamma = \frac{2\pi L\,\Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}. \tag{8}$$

De esta forma podemos graficar la dependencia de P como función de γ, para obtener el valor de la pendiente de la recta que describe dicha dependencia, usando el método de regresión lineal por mínimos cuadrados, la cual será numéricamente igual a κ. Es evidente que el procedimiento experimental consistirá en que, para diferentes valores de potencia disipada por la resistencia, se tomarán los valores de temperatura en la pared interior y exterior de las muestras cilíndricas hasta la saturación para obtener ΔT, y luego determinar κ usando el método gráfico descrito anteriormente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Iniciaremos nuestra discusión mostrando las medidas de las magnitudes de interés para cada muestra. En la Tabla 1 se presentan los valores de voltaje, intensidad de corriente, potencia eléctrica en la resistencia y temperatura en el interior y el exterior de la muestra M1. Las dimensiones para dicha muestra fueron: $d_e = (25.10 \pm 0.02)mm$ y $d_i = (14.42 \pm 0.02)mm$ diámetro exterior e interior, respectivamente, y $L = (27.30 \pm 0.02)mm$, la longitud en la dirección del eje del cilindro. Aquí es válido señalar que, la longitud L coincide con la longitud de la resistencia usada como agente disipador de calor.

De igual forma, en la Tabla II se muestran los mismos parámetros para la muestra M2. En este caso las dimensiones de la muestra fueron: $d_e = (24.62 \pm 0.02)mm$, $d_i = (14.44 \pm 0.02)mm$ y $L = (27.30 \pm 0.02)mm$.

A partir de los valores de las Tablas I y II, y las dimensiones de las muestras, se graficó la dependencia de P como función de γ para cada muestra. Las figuras 5(a) y 5(b) muestran dicha dependencia para M1 y M2, respectivamente. Desde las gráficas es posible apreciar la dependencia lineal entre P y γ para ambas muestras, lo cual está en correspondencia, al menos cualitativamente, con el modelo

físico utilizado. Los mejores resultados se obtuvieron en M2, lo cual puede estar relacionado con las propiedades térmicas del material de dicha muestra y la forma en las que se propaga el calor a través del material, y que discutiremos más adelante.

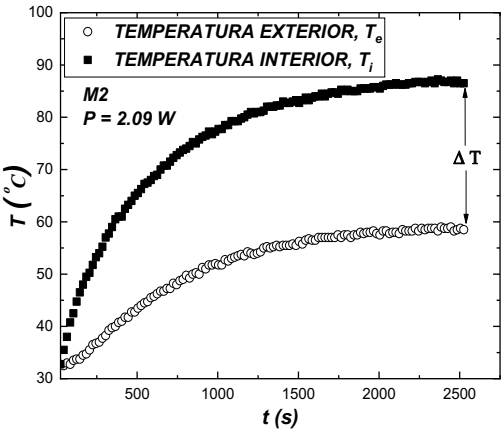

FIGURA 4. Selección de perfiles de temperatura para la muestra M2, medidos a una potencia de $P = 2.09\ W$. Nótese la vía para determinar ΔT.

TABLA I. Valores de las magnitudes de interés medidas para la muestra de yeso: T_e, temperatura exterior, T_i, temperatura interior, V, voltaje, I, intensidad de corriente y *P* potencia eléctrica.

MUESTRA M1				
T_e ±0.1 °C	T_i ±0.1 °C	V ±0.01V	I ±0.01A	P ±0.03W
39.8	47.3	1.03	0.55	0.57
42.0	51.0	1.32	0.68	0.89
45.3	60.5	1.52	0.78	1.19
47.5	65.8	1.71	0.88	1.51
51.3	75.8	1.93	0.99	1.91
54.3	83.5	2.15	1.10	2.37

TABLA II. Valores de las magnitudes de interés medidas para la muestra de ABS: T_e, temperatura exterior, T_i, temperatura interior, V, voltaje, I, intensidad de corriente y P potencia eléctrica.

MUESTRA M2				
T_e ±0.1 °C	T_i ±0.1 °C	V ±0.01V	I ±0.01A	P ±0.03W
36.3	42.3	0.95	0.42	0.40
42.5	52.5	1.15	0.58	0.67
47.5	62.5	1.44	0.73	1.05
52.0	74.0	1.74	0.88	1.53
52.8	78.0	1.91	0.95	1.82
59.5	87.5	2.05	1.02	2.09

A partir de estos resultados, y usando el procedimiento descrito en II.B, se calculó la pendiente de la recta que mejor ajusta los datos experimentales, la cual está asociada con la conductividad térmica, κ. Las figuras 5(a) y 5(b) muestran la dependencia de P como función de γ, y la recta obtenida de la regresión lineal, para ambas muestras. Aquí es posible apreciar la calidad del proceso, lo cual se evidencia además a través de los órdenes de magnitud de los parámetros de ajuste y los factores de correlación.

Una vez obtenido los valores de las pendientes, pudimos determinar la conductividad térmica para cada muestra, y los resultados se presentan en la Tabla III. El valor de *κ,* para la muestra M1, está en correspondencia con los reportados en la literatura [5, 6], los cuales se encuentran en el rango de $0.25 - 0.40\ {}^{W}/_{m\,K}$. Para el caso de M2, la literatura [7] reporta valores de $0.188\ {}^{W}/_{m\,K}$, evidenciando de igual forma la calidad de nuestro valor medido. Nótese, que para M1 el error relativo porcentual fue del 6 %, mientras que para M2 fue del 3 %.

TABLA III. Valores de conductividad térmica, κ, coeficiente de correlación y error relativo porcentual.

	$\kappa\ ({}^{W}/_{m\,K})$	R^2	E_R (%)
M1	0.249 ± 0.015	0.982	6.0
M2	0.203 ± 0.007	0.995	3.0

Estos resultados pueden estar relacionado con lo siguiente. Las propiedades térmicas de nuestras muestras están fuertemente influenciadas por su proceso de obtención. La formación de burbujas, poros y grietas, durante el vertido en el molde y el secado, pudieran ser determinantes en la conductividad térmica de la muestra de yeso. En cambio, para la muestra M2 se utilizó un método y unos parámetros de impresión que contribuyeron a la densificación del material, y, por tanto, a un valor de conductividad térmica asociado mayormente a las propiedades del material, y no a defectos microestructurales.

IV. CONCLUSIONES

La implementación de tecnologías Arduino e impresión 3D en una práctica de laboratorio para el estudio de la conductividad térmica permitió la adquisición de datos en tiempo real de diferentes magnitudes físicas con buena precisión. Los resultados obtenidos se correspondieron con los reportados en la literatura, lo que validó la fiabilidad del uso de estas tecnologías en la medición de la conductividad térmica.

Por otra parte, demostró ser una estrategia efectiva para contribuir a la enseñanza activa de la Física, contribuyendo a la formación integral de los estudiantes en áreas de la física experimental, la ingeniería y en la resolución de problemas, al combinar diferentes sensores, la escritura de códigos de programación y el diseño e impresión de partes y piezas para resolver problemas durante el montaje de la práctica.

Además, se reafirmó que los usos de estas tecnologías constituyen una alternativa viable en la enseñanza de la Física para instituciones con recursos limitados, al permitir la creación de dispositivos personalizados sin necesidad de equipos especializados costosos.

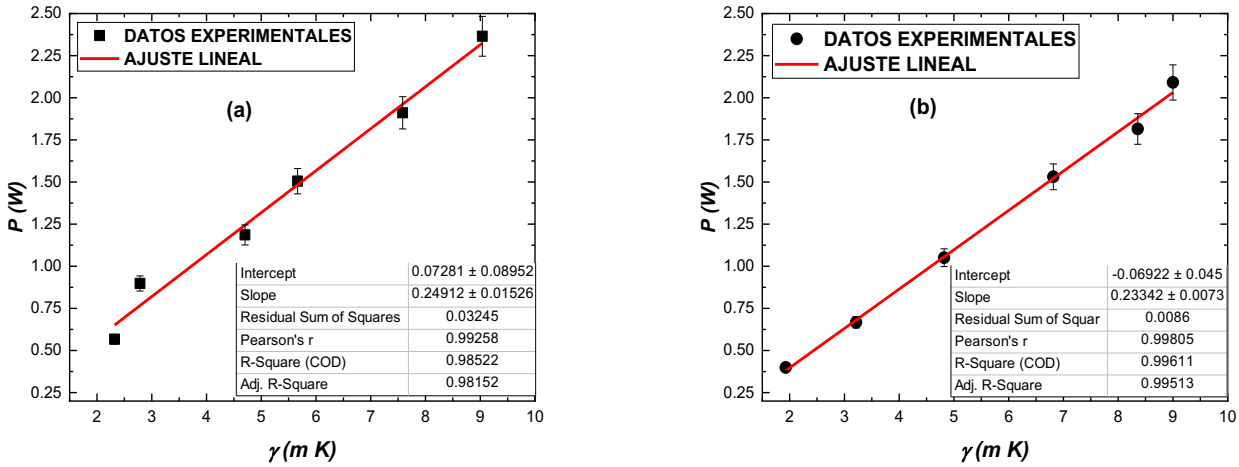

FIGURA 5. Gráficos de la dependencia de la potencia eléctrica, P, como función del factor γ, para las muestras M1 (a) y M2 (b). En línea continua se muestra la recta que mejor se ajusta a los datos experimentales. Las barras corresponden a un error del 5%.

REFERENCIAS

[1] Álvarez, J., Pérez, M., & Torres, R., *Tecnologías emergentes en la educación: Una revisión sistemática*, Revista de Innovación Educativa **15**, 45-60 (2020).

[2] Martínez, D., & García, L., *Uso de Arduino para la medición de parámetros físicos: Una aplicación en laboratorios de transferencia de calor*, Journal of Engineering Education **18**, 112-120 (2022).

[3] Óscar, H., & Ramírez, P., *Impresión 3D y Arduino en proyectos educativos: Retos y perspectivas*, Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa **10**, 22-34 (2021).

[4] López, F., Herrera, G., & Ruiz, A., *Limitaciones y oportunidades de la enseñanza experimental en ingeniería*, International Journal of Educational Technology 7, 98-112 (2019).

[5] Porras-Amores, C., Santa-Cruz-Astorqui, J., Del-Río-Merino, M., Villoria-Sáez, P. & Viñas-Arrebola, C., *Thermal behavior of traditional lightweight gypsum with construction and demolition waste materials*, Dyna **94**, 431-436 (2019).

[6] Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C., Pedreño-Rojas, M. A., *Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works*, Construction and Building Materials **114**, 6-14, (2016).

[7] Song, B., *Study on Dielectric and Thermal Properties of ABS / multilayer graphene Composites*, Journal of Physics: Conference Series, 2247 (2022).