

Actividad 3. La realidad en el mundo de lo muy pequeño. ¿Determinismo absoluto o determinismo probabilístico?

PROPÓSITO DE LA ACTIVIDAD

Que los estudiantes reflexionen y debatan sobre las nociones básicas de la mecánica cuántica y entiendan cómo ellas han contribuido a cambiar las ideas y modelos que teníamos sobre la naturaleza de la realidad.

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

OA 4

Evaluar la contribución de la física moderna y sus teorías estructuradoras (como relatividad y mecánica cuántica) al debate sobre la naturaleza de la realidad, así como su impacto sobre la sociedad, la tecnología y los sistemas naturales.

OA b

Planificar y desarrollar investigaciones que permitan recoger evidencias y contrastar hipótesis, con apoyo de herramientas tecnológicas y matemáticas.

OA f

Desarrollar y usar modelos basados en evidencia, para predecir y explicar mecanismos y fenómenos naturales.

ACTITUDES

Pensar con flexibilidad para reelaborar las propias ideas, puntos de vista y creencias.
Valorar las TIC como una oportunidad para informarse, investigar, socializar, comunicarse y participar como ciudadano.

DURACIÓN

14 horas pedagógicas.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

Activación

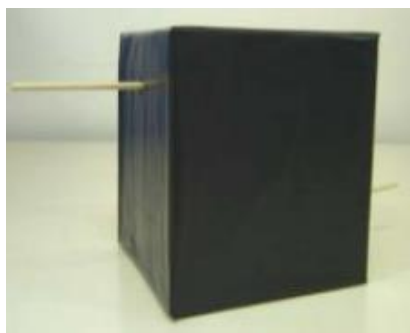
- Los estudiantes escuchan un texto como el siguiente, y luego responden algunas preguntas.

Te seguimos la pista, viajero...

Sabemos muy bien por lo que estás pasando con la aventura emprendida en los saberes modernos de la física. A nosotros nos pasó lo mismo. Las dudas, el error y la confusión fueron parte importante de nuestro camino. Todo este proceso es más natural de lo que te imaginas. Poco a poco irás asimilando los conceptos e ideas que desafían nuestros sentidos, percepción y lógica. Ahora navegarás en la mecánica cuántica, la que invita a reflexionar profundamente sobre la constitución y el comportamiento de la realidad natural de lo más pequeño. A pesar de que todavía la teoría cuántica presenta problemas de interpretación y distorsiones en su divulgación, es nuestro deber decirte que, hasta ahora, es increíble su éxito predictivo.

(Fuente: Texto elaborado por el equipo de ciencias de la UCE)

- ¿Qué piensan y sienten cuando escuchan o leen “las dudas, el error y la confusión fueron parte importante de nuestro camino. Todo este proceso es más natural de lo que te imaginas. Poco a poco irás asimilando los conceptos e ideas que desafían nuestros sentidos, percepción y lógica”?
 - ¿Qué es lo más pequeño de la realidad natural según su percepción?
 - ¿Por qué la mecánica cuántica presenta problemas de interpretación?
 - ¿A qué se referirá el texto cuando alude a que hoy la teoría cuántica presenta distorsiones en su divulgación?
- Luego los estudiantes, organizados en grupos, observan una experiencia demostrativa, “Caja negra”, y:
 - Construyen, colaborativamente, un modelo explicativo del fenómeno presentado por el docente.
 - Socializan sus modelos entre los grupos, y estudian las consideraciones relevantes y limitaciones de los modelos elaborados por sus compañeros.
 - Reflexionan colectivamente sobre el rol de los modelos en las ciencias físicas.



Observaciones al docente

- El objetivo de esta actividad es que los estudiantes desarrollen sus propios modelos para describir un determinado sistema físico y, desde aquí, poco a poco, se familiaricen con el rol de los modelos en la construcción del conocimiento científico, considerando sus alcances y limitaciones.
- En lo práctico, el mecanismo de funcionamiento permanece oculto (caja negra) hasta el momento final de la actividad, por lo que su construcción solo deberá ser conocida por el docente.

A continuación, se describen los pasos para construir la experiencia de la caja negra¹³:

1° Consiga los siguientes materiales: una caja de cartón pequeña, elástico, dos palitos para brochetas sin las puntas, un palito de helado, alambre grueso de cobre, cinta adhesiva y papel negro.

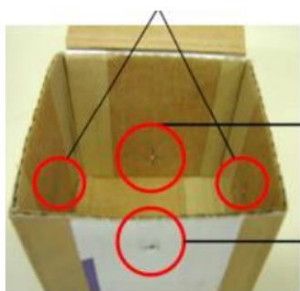
2° Haga un agujero en el centro del palito de helado y corte sus puntas de modo que la longitud quede un poco menor que la altura de la caja. A continuación, ate un palito de brocheta en cada extremo del palito de helado utilizando un elástico. Corte un pedazo de alambre grueso, mayor que la anchura de la caja y páselo por el centro del palito de helado.



3° Haga dos agujeros a la misma altura en dos lados opuestos de la caja para encajar el alambre. En otro lado, haga un agujero para el palito de brocheta superior y, en el lateral opuesto, otro agujero para el palito inferior.

4° Enganche el mecanismo dentro de la caja y, utilizando elástico y cinta adhesiva, sujete la parte más pequeña de los palitos de brocheta en las laterales de la caja.

Agujeros centrales



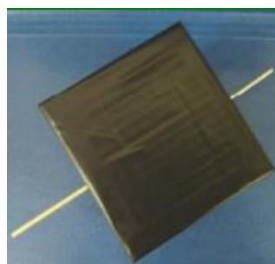
Agujero inferior

Agujero superior



5° Ahora mueva (empuje o tire con cuidado) uno de los palitos de brocheta para ver cómo el otro se comporta. Si está funcionando bien, cierre la tapa, cubra su caja con papel negro, sin que se note el alambre en las laterales.

Se entiende que funciona bien si empujando un palito de brocheta hacia dentro de la caja provoca que el otro palito de brocheta ingrese también a la caja, o bien, si se tira con cuidado un palito, el otro también se mueve hacia afuera de la caja.



- Hay que llevar la caja negra lista a la clase. Se sugiere llevar una caja más en caso de emergencia, pues siempre existe el riesgo de que algo no funcione.
- Realice la demostración para todos los estudiantes.
- Es muy importante que cada grupo tenga la oportunidad de manipular la caja y observarla con más detalles (2 minutos por grupo), y que el docente cautele que no la abran.

¹³ El paso a paso y montaje fue adaptado y traducido del trabajo de Bueno., L., Palmieri, M., Mendes, W. (2015). Fisistória. *Guía de experimentação*.

- Se sugiere darles 30 minutos para que elaboren su modelo y redacten o esquematicen su justificación.
- Cuando compartan sus modelos en clases y analicen el de sus compañeros, favorecer un ambiente de respeto.
- Una variación o complemento que podría hacerse a la actividad es que pongan a prueba sus modelos construyendo su propia caja negra.
- Para la reflexión en torno al rol de los modelos, puede apoyarse con el texto *Sobre modelos científicos*, disponible en: www.curriculumnacional/link/https://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?Sobre-modelos-cientificos. Asimismo, se recomienda plantear algunas preguntas; por ejemplo: ¿cómo construyen los físicos sus modelos? ¿Por qué los modelos cambian en las ciencias a lo largo de la historia? ¿Qué hace que un modelo sea más aceptado que otro en las ciencias?

Resolución de desafíos

- Los estudiantes observan un video como *¿Qué es la mecánica cuántica?* del canal CuriosaMente de YouTube, y luego:
 - Responden algunas preguntas:
 - ¿Cuáles son las ideas del texto que más les llamaron la atención?
 - ¿A qué personas se menciona?
 - ¿Qué dudas y preguntas les surgen tras ver el video?
 - Lo que explican en el video, ¿es la realidad misma o son modelos sobre la realidad natural?
 - ¿Qué aspectos del contenido del video son criticables desde la perspectiva de la naturaleza de las ciencias?
- En seguida, realizan una investigación acerca de los problemas que enfrentaba la física clásica a finales del siglo diecinueve, principalmente, la incapacidad de explicar el efecto fotoeléctrico y la existencia de espectros atómicos, y reflexionan colectivamente cómo esto promovió la necesidad de nuevos modelos y teorías.
- Explican el origen, el valor y el significado de la constante h de Planck.
- Elaboran un mapa conceptual con las principales ideas sobre la discontinuidad de la materia, desde Parménides hasta Schrödinger, pasando por los modelos atómicos de Dalton, Thompson, Rutherford, y de Bohr. Destacan los aportes de cada uno de estos modelos a la comprensión del átomo en su época, sus postulados básicos y sus limitaciones.

Observaciones al docente

- Enfatizar en que los modelos son aportes esenciales para interpretar la realidad natural, pero no son la realidad propiamente tal.
- Para apoyar la investigación y la reflexión sobre la crisis que enfrentó la física clásica, utilizar, por ejemplo, la discusión que aparece en el artículo *Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias*, disponible en internet.
- Para el estudio del efecto fotoeléctrico, se sugiere trabajar con algún simulador; por ejemplo, el disponible en www.curriculumnacional/link/https://phet.colorado.edu/es/simulation/photoelectric
- Es importante, también, conocer las dificultades en la enseñanza y el aprendizaje de la física cuántica, como los alertados por Sinarcas y Solbes (2013), quienes indican que los estudiantes:
 - No ven la física cuántica como un cambio necesario frente a los inconvenientes de la newtoniana.
 - No comprenden el papel de los modelos y no saben relacionar un salto de un electrón entre dos niveles con la correspondiente banda de color del espectro del átomo.
 - Representan al fotón y al electrón como partículas clásicas (con trayectorias u órbitas).
 - Interpretan erróneamente la dualidad (ondas y partículas, ondas o partículas según la experiencia).
 - No tienen una imagen clara de qué representa la ψ y, por lo tanto, un orbital.

- Interpretan las relaciones de indeterminación como un error en la medida por la pequeñez del electrón, el protón, etc. Mantienen el determinismo o las órbitas clásicas.
 - No tienen claros los límites de la física clásica ni las diferencias con la cuántica, porque no ven la física cuántica como un cambio frente a la newtoniana.
 - Desconocen los procedimientos implicados y, en particular, qué hacer cuando no coincide lo predicho por la teoría con los resultados del experimento.
 - No ven las conexiones de la física cuántica con la tecnología y la sociedad.
- Tener en cuenta, además, que muchos libros de física presentan serias limitaciones: muchos no abordan la crisis de la física clásica; no aluden al problema de cuerpo negro con el abordaje de electromagnetismo, termodinámica u otros pertinentes; no muestran las limitaciones del modelo pre-cuántico de Bohr; no presentan los electrones, neutrones, electrones, fotones y otros como objetos de tipo nuevo, en comparación a los modelos clásicos de onda y partícula; falta de claridad entre la diferencia entre física clásica y cuántica; escasez de relaciones entre física cuántica, tecnología y sociedad.

Experimentación

- Los estudiantes analizan experimentalmente el fenómeno de interferencia de ondas superficiales en agua y reproducen el experimento de Young de la doble rendija. Para esto:
 1. Preparan una cubeta de ondas de modo que exista un generador puntual de ondas circulares periódicas, y disponen de una doble abertura para que las ondas se difracten y luego interfieran. Analizan el patrón de interferencia que se obtiene y lo explican desde el punto de vista del modelo ondulatorio.
 2. Por una doble ranura (practicada en un vidrio ahumado) hacen pasar la luz de un puntero láser, reproduciendo el experimento de Young e identificando las zonas de interferencia constructiva y destructiva. Investigan la importancia que tuvo este experimento que convenció a la comunidad científica del comportamiento ondulatorio de la luz.
 3. Analizan un experimento equivalente a los anteriores, pero hecho con sonido, reconociendo que el sonido debe interferir constructivamente en algunos lugares y destructivamente en otros, produciendo zonas de silencio, con un patrón de interferencia similar a la de los experimentos anteriores.
 4. Comparan los experimentos anteriores de interferencia de ondas superficiales en agua con luz y con sonido. Explican cómo se puede determinar las longitudes de onda de las ondas a partir de los diagramas de interferencia.
 5. Predicen qué ocurrirá en un experimento similar a los anteriores, pero en el que, en vez de enviar ondas a una doble ranura, se envía electrones. ¿Qué ocurrirá si se envía los electrones de a uno? ¿Por qué ranura o abertura pasarán? ¿Qué patrón se obtendrá después de enviar muchos electrones?
 6. Investigan, finalmente, el resultado de este experimento (el de la doble ranura) realizado con electrones, tanto cuando se detecta la ranura por donde pasan como cuando no se detecta. Comparan sus predicciones con los resultados experimentales reales.

Observaciones al docente

- Esta segunda etapa se debe abordar en forma experimental, pero se recomienda reforzar los conceptos por medio de simulaciones como las que se muestran en

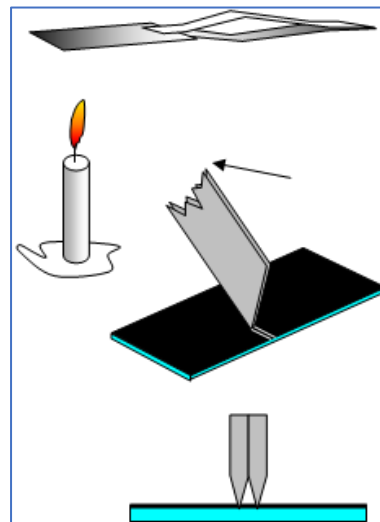
www.curriculumnacional/link/https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_es.html

Los experimentos con ondas superficiales en agua y la reproducción del experimento de Young no son muy complejos; en todo caso, será necesario ayudar a los estudiantes, especialmente en los montajes.

La figura de la derecha muestra una manera de producir una doble rendija adecuada para reproducir el experimento de Thomas Young. Primero, ahumar un portaobjeto de microscopía con una vela y después, con dos cuchillas de corta cartones juntas, rayar la zona ennegrecida para obtener una doble ranura. Recomiende a los estudiantes tener cuidado al realizar estos procedimientos.

Al hacer pasar por la doble ranura la luz de un puntero láser, podrá proyectarse el diagrama de interferencia en un telón.

Señalar a los estudiantes el impacto del experimento de Young, el cual convenció a los físicos de su época de la naturaleza ondulatoria de la luz, a lo cual se sumaron después las predicciones y descubrimientos de las ondas electromagnéticas por parte de Maxwell y Hertz.

**Investigación**

- Los estudiantes realizan una pequeña investigación en internet u otras fuentes sobre el significado del principio de incertidumbre de Heisenberg, respondiendo posteriormente algunas preguntas como las siguientes:

- ¿Cómo y en qué contexto Heisenberg llegó a desarrollar el principio de incertidumbre? Describan.
- ¿Cuál es el origen de las incertezas presente en toda medición? Expliquen.
- La indeterminación en el principio de incertidumbre de Heisenberg, ¿es producto de la imprecisión de los instrumentos y técnicas de medida? Argumenten brevemente.
- ¿A qué corresponde cada uno de los símbolos que figuran en la expresión matemática siguiente: $(\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi})$?
- ¿Cómo se interpreta el significado de este principio desde el punto de vista de la física?
- ¿Podemos aplicar el principio de incertidumbre de Heisenberg a la escala humana? Argumenten.
- ¿Qué otras preguntas les surgen a partir del estudio del principio de incertidumbre de Heisenberg?
- ¿De qué manera el principio de incertidumbre de Heisenberg contribuye a la reflexión y el debate sobre la naturaleza de la realidad?

Observaciones al docente

- Se sugiere observar algunos breves videos sobre el principio de incertidumbre de Heisenberg disponibles en los canales de YouTube Date un Voltio o Quantum Fracture. También pueden ver el documental *Todo sobre la incertidumbre*, de Discovery Channel, disponible en internet.
- Una vez presentada la expresión matemática de este principio, hay que ilustrar su significado con variados ejemplos, destacando los siguientes aspectos:
 - La imposibilidad de conocer simultáneamente, y con toda la precisión que se quiera, la posición y el momento lineal de una partícula subatómica. Esto debe entenderse como una limitación impuesta por la propia naturaleza, al conocimiento que podemos tener de ella.

- b) En lo que se refiere a su interpretación, señalar, por ejemplo, la necesidad de “iluminar” una partícula para poder localizarla con mayor intensidad mientras se requiera más precisión en su localización, lo cual la afecta y cambia significativamente su momento lineal, incrementando la incerteza en la determinación de su velocidad.
- c) Puede ser oportuno indicar que la expresión antes señalada corresponde a situaciones unidimensionales.
- d) El concepto de trayectoria deja de tener sentido.

- Los estudiantes profundizan en algunos aportes de Schrödinger, para lo cual:
- Analizan en qué consiste la paradoja del gato de Schrödinger.
 - Leen la siguiente noticia sobre el gato de Schrödinger y responden algunas preguntas:

BBC Menú

NEWS | MUNDO

Noticias | Centroamérica Cuenta | América Latina | Internacional | Economía | Tecnología

Cómo encontraron la forma de salvar al gato de Schrödinger, el experimento más famoso de la física cuántica

Redacción
BBC News Mundo

© 6 junio 2019

f WhatsApp Twitter Email Compartir

El gato de Schrödinger es célebre por simbolizar algunas de las características más desconcertantes de la física cuántica.

El experimento mental propuesto en 1935 por el científico austríaco Erwin Schrödinger ejemplifica tanto la imprevisibilidad como la llamada superposición, la posibilidad de que dos estados opuestos existan simultáneamente.

En la paradoja planteada por Schrödinger, quien recibió el Nobel de Física en 1933, el gato está vivo y muerto al mismo tiempo. Y ninguno de esos estados puede ser anticipado. Pero científicos de la Universidad de Yale en Estados Unidos encontraron ahora una forma no solo de predecir el estado del famoso gato, sino de salvarlo¹⁴.

1. ¿Qué preguntas les surgen tras leer la noticia?
 2. ¿Cuál es el rol de los experimentos mentales en la física? Expliquen.
 3. ¿A qué se refiere la idea de “superposición” en la física cuántica?
 4. La posibilidad de que un gato esté vivo o muerto, ¿corresponde a la realidad tal y como es, a una creencia o a un modelo? Argumenten.
 5. ¿Cuál es el aporte de los científicos de la Universidad de Yale a la propuesta del gato de Schrödinger?, ¿les hace sentido? ¿Qué dudas o sentimiento les evoca?
- Investigan en diversas fuentes la ecuación de Schrödinger en situaciones unidimensionales y, desde el punto de vista gráfico, algunas de sus soluciones para partículas subatómicas en diversas circunstancias; en sus conclusiones destacan aspectos como:
 1. El origen y el desarrollo histórico de esta ecuación.
 2. Su significado e interpretación probabilística de sus soluciones.
 3. El concepto de barrera de potencial.
 4. La posibilidad de que una partícula cruce una barrera de potencial por un túnel cuántico.
 5. La contribución de Schrödinger al debate sobre la naturaleza de la realidad.

¹⁴ www.curriculumnacional/link/https://www.bbc.com/mundo/noticias-48542209

Observaciones al docente

- Se sugiere utilizar algunos videos cortos sobre el Gato de Schrödinger, como los disponibles en los canales de YouTube de MinutodeFísica o Date un Voltio.
- En esta etapa, centrada en la ecuación de Schrödinger, limitarse a los aspectos históricos y a los análisis gráficos y cualitativos. Lo importante es resaltar el hecho de que la realidad a nivel de lo muy pequeño puede describirse como una onda cuya ecuación predice y da cuenta de muchos fenómenos, entre los cuales destaca el que una partícula subatómica pueda escapar de pozos de potencial o cruzar barreras de potencial (cosa imposible según la física clásica) y que las predicciones se limitan solo a señalar probabilidades. También es importante destacar, por ejemplo, cómo esta ecuación explica los postulados del modelo atómico de Bohr con gran exactitud, incluidas las líneas de emisión del espectro del átomo de hidrógeno.

Diseño de un recurso de divulgación

- Finalmente, los estudiantes elaboran un recurso de divulgación sobre las principales ideas de la mecánica cuántica y sus resultados, según lo estudiado en la presente actividad. Este recurso debiese incluir:
 6. El desarrollo histórico del concepto de cuantización.
 7. La interpretación de los resultados de los experimentos sobre interferencia de electrones en una doble ranura.
 8. La paradoja del gato de Schrödinger.
 9. El principio de incertidumbre de Heisenberg.

Observaciones al docente

- De ser posible, y considerando la autorización de los estudiantes, compartir los recursos de divulgación en las redes sociales de la Sociedad Chilena de Enseñanza de la Física (SOCHEF).

Algunos indicadores para evaluar formativamente esta actividad pueden ser:

- Explican fenómenos a pequeña escala con base en principios de la mecánica cuántica.
- Argumentan la contribución de la física moderna para el debate sobre la naturaleza de la realidad.

RECURSOS Y SITIOS WEB

- *¿Qué es la mecánica cuántica?* Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=uHrCIWsxMt0;
- *Aplicaciones de la física cuántica.* Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=ReNW6v2H2w
- *Barreras de Potencial y Tunelamiento.* Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=mFYhtt2nzPk;
- *Breve introducción a la mecánica cuántica.* Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://ingenieriainformatica.cat/wp-content/uploads/2016/05/BREVE-INTRODUCCI%C3%93N-A-LA-MEC%C3%81NICA-CU%C3%81NTICA.pdf
- Cabello, A. (2017). El puzzle de la teoría cuántica. ¿Es posible zanjar científicamente el debate sobre la naturaleza del mundo cuántico? *Investigación y Ciencia*. Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/la-red-de-la-memoria-712/el-puzzle-de-la-teora-cuntica-15554
- Castrillón, J., Freire, O., Rodríguez, B. (2014). Mecánica cuántica fundamental. Una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(1), 1505 (1-12).
- Gratton, J. (S.N) *Introducción a la Mecánica Cuántica*. Recuperado de www.curriculumnacional/link/http://www.lfp.uba.ar/es/notas%20de%20cursos/notasmecanicacuantica/Cuantica.pdf.
- *La mecánica cuántica.* Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=NpwpbH37-E8.
- *Mecánica cuántica.* Recuperado de www.curriculumnacional/link/http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/FisicaModerna.htm
- *Mecánica cuántica.* Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.ecured.cu/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica;
- Sinarcas, V., Solbes, J. (2013) Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato, *Enseñanza de las Ciencias*, 31(3), 9-25.
- Solbes, J., Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, 57-85.
- Sus, A. (2017). Mecánica cuántica: interpretación y divulgación. *Investigación y Ciencia*. Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/el-origen-de-la-tecnologa-709/la-mecnica-cuntica-contada-de-otra-forma-15392

