

Actividad 2. ¿Qué significa que el espacio-tiempo sea curvo? Einstein y la relatividad general

PROPÓSITO DE LA ACTIVIDAD

Que los estudiantes reflexionen y debatan sobre la contribución de la teoría de la relatividad general de Einstein al entendimiento de la naturaleza y 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 c

Describir patrones, tendencias y relaciones entre datos, información y variables.

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

16 horas pedagógicas.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

Activación

- A modo de introducción, los estudiantes:
 1. Analizan una película de ciencia ficción como *Interestelar*, que trata de un agujero negro y de viajes en el tiempo; o documentales como *El Universo de Stephen Hawking*; Cap. 2: Viajar en el tiempo, disponible en YouTube.
 2. Realizan una “lluvia de ideas” para responder preguntas como:
 - ¿Qué nuevas ideas introducirá la teoría general de la relatividad sobre la teoría especial estudiada en la actividad anterior?
 - ¿En qué situaciones la mecánica de Newton sigue siendo de utilidad práctica?, ¿en cuáles ya no corresponde usar la física de Newton?
 - ¿Qué es una línea recta?, ¿un triángulo?, ¿una esfera?
 - ¿Cómo serán esas geometrías distintas a la de Euclides, que es la que nos enseñan en la asignatura Matemática?
 - ¿Hay rectas, triángulos, esferas, etc. en el mundo real que pretende estudiar la física?
 - ¿Qué habrá que entender por una realidad de cuatro dimensiones?
 - ¿Cómo se relaciona el tiempo con la cuarta dimensión?
 - Según la física actual, ¿cómo sería posible viajar en el tiempo?
 - ¿Por qué la luz no puede escapar de los agujeros negros?
 - ¿Qué puede significar que el universo, a gran escala, presente una curvatura?
 - ¿Qué otras preguntas les surgen?

Observaciones al docente

- Esta etapa es principalmente de carácter motivacional, pero permite además recabar información acerca de dos aspectos: los conocimientos que ya posean los estudiantes y las preconcepciones erróneas que puedan arrastrar sobre esta área de la física, que se explica porque la divulgación de la teoría general de la relatividad suele ser confusa.
- La película que se recomienda analizar, *Interestelar*, contó con la asesoría del físico teórico Kip Thorne, particularmente en los efectos especiales, pero también ha recibido la crítica en aspectos científicos. Véase, por ejemplo: www.curriculumnacional/link/https://danielmarin.naukas.com/2014/11/09/los-aciertos-y-errores-de-insterstellar/

Construcción de explicaciones

- Los estudiantes discuten sobre si es posible distinguir, mediante un experimento, si se está en un campo gravitacional (una habitación sin ventanas aquí en la superficie terrestre, por ejemplo) o en un sistema de referencias acelerado (una nave espacial, también sin ventanas, que acelera respecto de las estrellas lejanas a razón de $9,8 \text{ m/s}^2$, por ejemplo).
 1. Para ello, discuten en parejas acerca de lo que ocurre en los siguientes experimentos:
 - Cómo se mueven las manzanas al dejarlas caer libremente en cada uno de los sistemas de referencias mencionados.
 - Las trayectorias que siguen rayos de luz en cada uno de los sistemas de referencias mencionados.
 - Cómo ocurren las cosas dentro de un ascensor que cae libremente aquí en la Tierra y cómo suceden en una nave espacial muy lejos, en el vacío del espacio.
 2. Explican el significado del principio de equivalencia de la teoría general de la relatividad, y analizan las consecuencias y predicciones que se derivan de él. Por ejemplo:

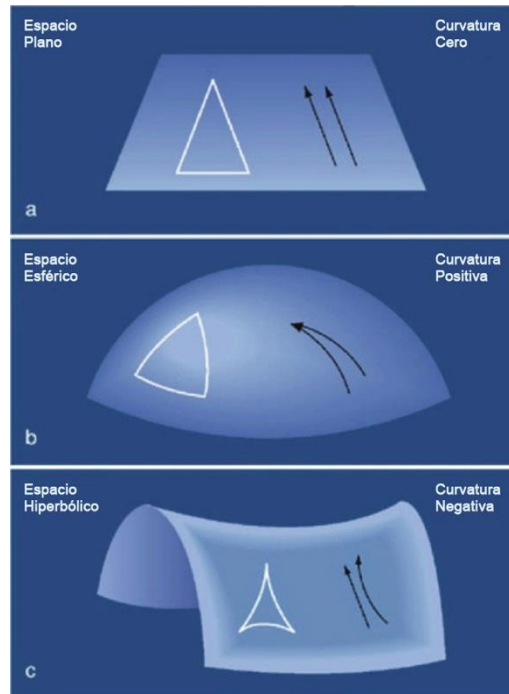
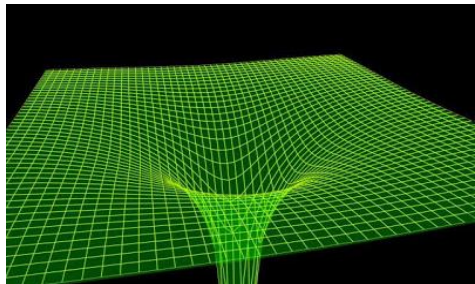
- La necesidad de reconocer que el espacio-tiempo, si se acepta la constancia de la velocidad de la luz, debe obedecer a una geometría distinta a la de Euclides o presentar cierta curvatura.
- Investigan la verificación que hizo Sir Arthur Eddington de la curvatura del espacio-tiempo alrededor del Sol en el eclipse solar de 1911 en la Isla Príncipe de África.
- La explicación del movimiento “anómalo” del perihelio del planeta Mercurio, por no poder ser explicado por la mecánica de Newton.
- El descubrimiento de agujeros negros.
- El descubrimiento de lentes gravitacionales.

Observaciones al docente

- Para esta segunda etapa, que trata del principio de equivalencia (clave para entender la relatividad general), puede ser oportuno apoyarse en videos (y animaciones) disponibles en internet, como *Relatividad [Experimento mental del Principio de Equivalencia]*, en YouTube, y resaltar los siguientes aspectos:
 - La importancia de los “experimentos pensados”, como los que empleó Einstein para concebir sus teorías.
 - Que la luz se mueve en línea recta y con rapidez constante en todos los sistemas de referencias, cuestión que vincula el concepto geométrico de recta (mundo de las ideas) con la propagación de la luz en un medio homogéneo (mundo real).
 - Señalar las condiciones de aislamiento en que se encuentran los sistemas de referencias que hay que considerar para el enunciado del principio de equivalencia: imposibilidad de observar fuera del laboratorio; pequeñas dimensiones del laboratorio; equipos para producir distintos fenómenos (mecánicos y con luz), e instrumentos adecuados para realizar todo tipo de mediciones y con total exactitud.
 - Que la fuerza de gravedad puede ser entendida como consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo; es decir, que una manzana cuando cae, un planeta que orbita una estrella, etc. no se mueven como consecuencia de la fuerza de gravedad, sino que, lo hacen porque siguen la curvatura del espacio-tiempo a través de trayectorias denominadas geodésicas.
 - Puede apoyarse con explicaciones breves sobre relatividad general disponibles en algunos canales de YouTube, como Quantum Fracture o Date un Voltio.

Descripción de geometrías que puede adoptar el espacio-tiempo

- En seguida, los estudiantes consideran imágenes como las siguientes, que típicamente pretenden representar la curvatura del espacio-tiempo relativista, y luego responden a algunos desafíos.



3. Describen cualitativamente, por medio de modelos y esquemas, las características de las distintas geometrías que puede adoptar el espacio-tiempo según la teoría general de la relatividad. Para esto:
 - Consideran la geometría de Euclides: su importancia histórica y práctica, los postulados que la caracterizan (especialmente el quinto postulado) y su significado e implicancias en el mundo físico de Newton.
 - Consideran las geometrías no euclidianas en espacios con curvaturas positivas y negativas y cómo se separan de la geometría de Euclides (en el quinto postulado), y en algunos teoremas geométricos básicos; por ejemplo: cuánto suman los ángulos interiores de un triángulo, cómo es la medida de la hipotenusa en relación con los catetos en un triángulo rectángulo (teorema de Pitágoras), etc.
4. Discuten acerca de qué geometría es la que le corresponde realmente al universo físico y cómo se puede dirimir una discusión como esta.
5. Formulan hipótesis sobre la realidad en el universo físico de las geometrías no euclidianas y las formas de ponerlas en evidencia.

Observaciones al docente

- Para la tercera etapa, que trata de la geometría del espacio-tiempo, es necesario:
 - Analizar las diversas geometrías desde el punto de vista lógico, tanto respecto de las dimensiones como en relación con sus postulados. Hacer ver que se puede construir cualquier geometría con el número de las dimensiones que se desee y que los postulados son arbitrarios. Que la geometría del mundo real debe determinarse experimentalmente.
 - Acudir, como es tradicional, a mundos habitados por seres bidimensionales que hacen geometrías en espacios-tiempos planos, esféricos (cerrados) y con forma de silla de montar (abiertos), para explicar la curvatura del espacio.

Investigación

- Los estudiantes investigan las consecuencias más importantes de la teoría general de la relatividad, guiados por los siguientes desafíos:
 6. En el caso de los agujeros negros:
 - Analizan la historia de su estudio, desde el clérigo inglés John Michell hasta la actualidad, pasando por Albert Einstein, Stephen Hawking y la primera fotografía de uno de ellos publicada el 10 de abril de 2019.
 - Investigan las formas en que se los clasifica (activos e inactivos; micros y macros; etc.) y las técnicas con las que se los pone en evidencia.
 - Explican lo que ocurre con el espacio-tiempo fuera, dentro y en el horizonte de sucesos de un agujero negro.
 - Investigan lo que se piensa que puede ocurrir con la materia en su interior.
 - Explican el posible origen de los agujeros negros.
 - Investigan las opiniones de los astrónomos sobre la existencia de agujeros blancos y los agujeros de gusanos que los comunicarían.
 - Especulan sobre el significado que puedan tener acerca de la evolución del universo.
 7. En el caso de las ondas gravitacionales detectadas en 2016:
 - Describen su historia, las tecnologías con las que fueron detectadas y las futuras utilidades que pueda tener en la investigación astronómica.
 8. Analizan, desde el punto de vista científico, el mal uso que en ciertos contextos se hace del concepto de dimensión; asociándolo, por ejemplo, a misterios como “portales” para pasar de una a otra dimensión.
 9. En el caso de las implicancias cosmológicas:
 - Investigan la predicción de la teoría del Big Bang, la inestabilidad que implican las ecuaciones de la teoría general de la relatividad y la necesidad de que se esté expandiendo o comprimiendo.
 - Describen las posibles geometrías del espacio-tiempo a escala global (cerrado, abierto y plano) y la posible finitud o infinitud del universo.
 - Explican lo conveniente de considerar el espacio-tiempo como una sola entidad, en vez de referirse separadamente al espacio y al tiempo, y que esta entidad es de cuatro dimensiones.
 - Analizan las posibilidades reales de viajar en el tiempo (por ejemplo, al futuro) al moverse cerca de un agujero negro.

Observaciones al docente

- Si los estudiantes no vieron la película *Einstein y Eddington* en la unidad 1 sobre el cosmos, es una excelente oportunidad para verla y analizar algunos aspectos sobre la construcción del conocimiento científico y el contexto sociocultural. La película está disponible en internet.
- Explicarles a qué corresponden las dimensiones en matemática (desde la mirada de la geometría). Por una parte, la consistencia de considerar el espacio-tiempo como una entidad de cuatro dimensiones y, por otra, la necesidad de realizar (por medio de planos) cortes geométricos en espacios de cuatro dimensiones para ayudar a la imaginación.

- Finalmente, en grupos, enfrentan el desafío de elaborar una infografía con el uso de TIC sobre las principales ideas y aportes de la teoría general de la relatividad. La socializan entre sus propios compañeros y eligen tres para publicarlas en redes sociales o páginas web desde donde se puede cargar recursos educativos.

Observaciones al docente

- Colabore con los estudiantes para que organicen sus ideas y reflexiones. Como se ha insistido, el tema es contra-intuitivo, y ya se les hace complejo entenderlo. Por eso, para diseñar el recurso, sería conveniente plantearles algunas preguntas que puedan guiar la organización de la información; por ejemplo: ¿a qué público va dirigida su infografía (niños, jóvenes, adultos, ancianos u otro)? ¿Qué aspectos les gustaría destacar y por qué? ¿Qué recursos les ayudarán a transmitir de forma efectiva de la información (gráficos, imágenes, tablas, fotografías u otro)? ¿Cómo debiese secuenciarse la información?
- Recordarles que en internet hay varios tutoriales sobre qué tener en cuenta para diseñar infografías.
- Incentive una evaluación entre pares sobre la infografía diseñada, enfocándose en aspectos como rigurosidad conceptual, creatividad e imaginación, entre otros. Para que esta práctica resulte más eficiente, se sugiere co-diseñar con ellos una rúbrica; incluso la pueden elaborar antes de hacer la infografía.
- Finalmente, haga que los alumnos reflexionen y tomen conciencia sobre el proceso desarrollado, sus sentimientos, emociones y obstáculos durante la actividad, y las ideas físicas en las que aún tienen dificultades.

Algunos indicadores para evaluar formativamente esta actividad pueden ser:

- Aplican conceptos y modelos de la teoría de la relatividad especial y general para analizar fenómenos.
- Argumentan la contribución de la física moderna para el debate sobre la naturaleza de la realidad.

RECURSOS Y SITIOS WEB

- Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (2015). La Teoría de Relatividad General de Einstein. Universidad de Chile. Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=C1b8O_itOZM;
www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=GT_HdtrgolbE;
www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=vG1vXgDvvqY;
www.curriculumnacional/link/https://www.youtube.com/watch?v=VTPZFXzUqZg.
- Cosmo Educa (S.N) *Gravitación*. Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://www.iac.es/cosmoeduca/gravedad/temas/g1.htm
- S.N. (2018) *Las ecuaciones de campo de la relatividad general. Cuaderno de Cultura Científica*. Recuperado de www.curriculumnacional/link/https://culturacientifica.com/2018/03/27/las-ecuaciones-de-campo-de-la-relatividad-general/