

Una visión actual de la gravitación para el aula

Comparación histórica, fenomenología y simulaciones

Ileana M. Greca
Universidad de Burgos

Irene Arriasecq
Universidad Nacional del Centro de la
Provincia de Buenos Aires (Argentina)

Díaz en Unepublish

En este trabajo analizamos algunos aspectos del concepto de gravitación para ser abordados en la educación secundaria a partir de la adopción de un doble enfoque: por una parte, una comparación de las diversas concepciones científicas aceptadas referidas al concepto a lo largo del tiempo, apoyados en la fenomenología, y, por otra parte, en los aportes de numerosas simulaciones actualmente disponibles, seguido de un enfoque más operacional.

PALABRAS CLAVE

- GRAVITACIÓN NEWTONIANA
- GRAVITACIÓN EINSTEINIANA
- HISTORIA DE LA CIENCIA
- SIMULACIONES COMPUTACIONALES

La gravitación, o sus efectos, es uno de los conceptos más generalizados que «vivenciamos» y quizá el primero al que le dedicamos una concienzuda experimentación cuando aún somos bebés, para desespero de nuestros padres, alzando cuanto tiramos al suelo a partir de los seis meses. Por otra parte, es tan sutil que la gravedad que ejerce todo el planeta no puede imponerse a nuestros músculos

cuando levantamos un brazo y, al mismo tiempo, está tan presente que controla la evolución de todo el universo (Chown, 2019). No es de extrañar que desde los griegos se empezase a especular sobre sus causas y que haya sido la primera interacción física en ser descrita usando un sólido marco científico. Así, en alguna medida, la historia de la gravedad es también la historia de la física, con sus científicos y científicas más

reconocidos tratando de definir esta acción que regla nuestras vidas. Sin embargo, después de más de cuatrocientos años estudiándola, sigue siendo uno de los mayores misterios de la ciencia y uno de sus temas más apasionantes.

Para nuestro alumnado, además de ser un aspecto central en las asignaturas de ciencias naturales y de física, resulta uno de los asuntos considerados más aburridos y «viejos» –apoyados por las siempre presentes imágenes de Newton y la manzana y de un Einstein de cabello blanco–. Sin embargo, en los últimos años ha sido un tema de interés en los medios de comunicación a partir de la detección de las ondas gravitacionales en 2016, tanto de la teoría general de la relatividad como de la ley de la gravitación universal newtoniana, al intentar explicar este fenómeno. Pero, realmente, ¿qué debemos o podemos explicar de la gravitación? Aquí argumentaremos que sería interesante adoptar un doble enfoque: en primer lugar, una comparación de las diversas concepciones científicas aceptadas sobre esta interacción a lo largo del tiempo, apoyados en la fenomenología –algunos fenómenos tan espectaculares como los agujeros negros o tan sencillos como la caída de la manzana– y en los numerosos recursos visuales y dinámicos (simulaciones, animaciones y vídeos) actualmente disponibles, seguido de un enfoque más operacional. Este doble encuadre permite motivar al estudiantado al proponerle abordar cuestiones actuales y, al mismo tiempo, promover una discusión epistemológica actualizada del quehacer científico, así como, por último, dotarlo de las herramientas físicas y matemáticas que va a necesitar en sus estudios. Cabe destacar que esta propuesta no presupone que primero el alumnado «comprenda» la gravitación newtoniana para luego pasar a conceptualizaciones de la relatividad general,

siendo la propuesta válida para cualquier curso de educación secundaria o bachillerato. El énfasis o profundidad en el desarrollo de cada parte, en particular de la operacional, dependerá del nivel del alumnado.

IDEAS DEL ALUMNADO ACERCA DE LA GRAVEDAD

La omnipresencia de la acción de la gravedad se ve reflejada en la persistencia de las concepciones alternativas del alumnado, aun en cursos universitarios. Así, son ideas comunes que la gravedad disminuye con la altura; que flotar es igual a la ingravidez; que cuanto más alto estás, más fuerte golpeas el suelo, porque la gravedad es mayor; que la gravedad aumenta a medida que cae un objeto; que los objetos más pesados caen antes; que no hay gravedad cuando el objeto cae libremente; que no hay gravedad en la Luna porque no tiene atmósfera; que hay menos gravedad en este satélite porque está lejos de la Tierra; que no hay gravedad en el espacio. Refiriéndose solamente al alumnado de secundaria y de universidad, Galili y Kaplan (1996) encontraron, además, que solo se utiliza un concepto de peso (no hay pesos verdaderos y aparentes como en la enseñanza); que el peso de un cuerpo disminuye con la distancia a las fuentes de gravitación; que es una cualidad inherente e invariable de un cuerpo; y que puede ser modificado por otras fuerzas o presiones (aire, agua y tierra). Estas ideas mezclan las con-

■
Proponemos trabajar la gravitación comparando los cambios en la forma de conceptualizarla

cepciones de origen sensorial del estudiantado con una deficiente comprensión desarrollada a partir de la enseñanza.

LOS CAMBIOS EN LO QUE ENTENDEMOS POR GRAVEDAD DESDE UNA PERSPECTIVA DIDÁCTICA

Como indicamos antes, proponemos trabajar la gravitación comparando los cambios en la forma de conceptualizarla. Para ello podría usarse la conceptualización del espacio y el tiempo desde las ideas de Newton hasta las interpretaciones sustancialistas recientes del espacio-tiempo basadas en la teoría de la relatividad general (Levrini, 2002). Otra posibilidad es trabajar las dos principales divisiones conceptuales que han tenido lugar en la historia del concepto de peso: la primera asociada con la comprensión newtoniana de la gravitación y la segunda con la comprensión einsteiniana del origen no único del peso (Galili, Bar y Brosh, 2016). En nuestro caso, vamos a ilustrar esta comparación con la propia conceptualización de la gravitación, ayudándonos de apoyos visuales dinámicos (simulaciones y animaciones).

El salto conceptual de Newton, que se hizo público en su tratado *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* de 1687, consistió en darse cuenta de que cada objeto del universo –desde un grano de arena hasta las estrellas gigantes– atraía a todos los objetos. Esta noción unificó acontecimientos que parecían no tener ninguna relación, desde las manzanas que caen a tierra hasta los planetas que orbitan alrededor del Sol. Además, fue capaz de cuantificar esta atracción: duplicar la masa de un objeto implica que su atracción sea el doble de fuerte, y que acercar dos objetos al doble cuadruplica su atracción mutua. Newton agrupó

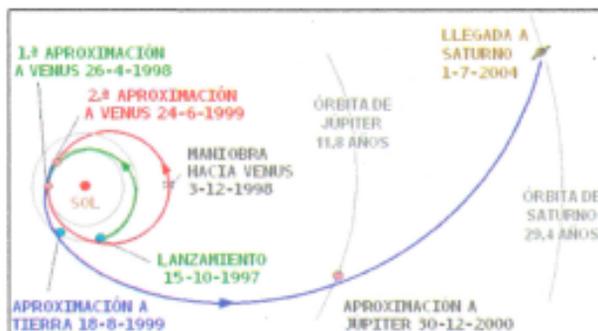


Imagen 1. Cálculo de la trayectoria de la misión Cassini. Imagen original de la NASA

estas ideas en su ley universal de la gravitación, con la cual no solo unificó el universo aristotélico dividido en dos partes bien diferenciadas que se comportaban de acuerdo a leyes distintas, sino que, además, su descripción de la gravitación fue lo suficientemente precisa como para detectar la existencia de Neptuno a mediados del siglo XIX, antes de que nadie pudiera verlo, que hoy nos sirve para preparar las misiones espaciales (imagen 1).

Pero el modelo newtoniano no es perfecto, como todo modelo. En el siglo XIX, los astrónomos observaron que la elipse trazada por la órbita de Mercurio se movía más rápidamente alrededor del Sol de lo que la teoría de Newton predecía, lo que sugería un ligero desajuste entre su ley y las leyes de la naturaleza. La teoría general de la relatividad de Einstein, publicada en 1915, resolvió el rompecabezas.

Antes de avanzar hacia ella vamos a detenernos en el concepto newtoniano de gravitación. Para Newton, la gravedad es una fuerza que se ejerce de forma instantánea entre dos cuerpos. Para precisar esta idea, con la que ni siquiera Newton estaba de acuerdo, Laplace intentó modelar la gravedad

como una especie de campo de radiación o fluido y, desde el siglo XIX, las explicaciones de la gravedad suelen darse, a partir de los últimos cursos de la educación secundaria, en términos de un modelo de campo, en lugar de a causa de una atracción puntual. Esta formulación se basa en la noción de campo gravitatorio, y consiste en promover la interacción gravitatoria en un objeto físico. Este cambio conceptual es comparable a la reformulación de la electrostática a la electrodinámica. En la primera, existe una fuerza entre cargas eléctricas; en la segunda, hay un campo electromagnético que se ve afectado por la existencia y el movimiento de las cargas que afecta a su vez al movimiento de estas. Sin embargo, esta formulación de la gravitación newtoniana no implica un campo «real». Y no solo eso, sino que, tal como lo expresó Einstein en 1907 en el comienzo de su camino hacia la teoría general de la relatividad, «el campo gravitatorio [...] tiene solamente una existencia relativa. Porque si uno considera a un observador en caída libre, por ejemplo, desde el tejado de una casa, no existe para él campo gravitatorio durante su caída, al menos en su vecindad inmediata».

El *insight* anterior fue el punto de partida para la reformulación einsteniana de la gravitación: para Einstein, la gravitación se manifestaba en la curvatura espacio-temporal. La comprensión actual de la teoría general de la relatividad puede expresarse, de manera sintética, en la célebre frase de Wheeler: «El espacio le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio cómo curvarse», en la que habrá que reemplazar, para ser

■

«El espacio le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio cómo curvarse»

más precisos, espacio por espacio-tiempo y materia por materia y cualquier forma de energía. Este es un hecho importante, que la distingue de la conceptualización de la gravedad de Newton: no solo la masa gravita activamente, sino cualquier forma de energía. En particular, un gas caliente, que tiene más energía que un gas frío o un rayo de luz, que contiene energía y momento, también curvan el espacio-tiempo a su alrededor y, por lo tanto, producen una atracción gravitatoria. De esta forma, la teoría general de la relatividad elimina las fuerzas gravitatorias (¡cuidado, solo estas!), interpretando el efecto de masas y energía como una modificación de la métrica espacio-tiempo que resulta ser riemanniana en lugar de euclídea. Así, en esta nueva métrica, las trayectorias de las partículas corresponden a las geodésicas del espacio-tiempo, o sea, las líneas de mínima longitud que unen dos puntos en él.

La teoría general de la relatividad es, hoy por hoy, la mejor descripción de la gravedad de la que disponemos, comprobada innumeradas veces, empezando por explicar el problema con el perihelio de Mercurio. Sin embargo, los físicos consideran que no es una descripción «correcta», pues entra en conflicto con la mecánica cuántica. Entre otras cosas porque esta supone, a escalas pequeñas, un universo discontinuo en oposición al continuo espacio-tiempo de la propuesta de Einstein.

ENTONCES, ¿QUÉ HACE QUE LA MANZANA CAIGA?

El debate sobre la conceptualización de la gravedad puede ejemplificarse con la famosa manzana. En el caso de la ley de la gravitación universal la manzana, mientras está en la rama, está sujeta a una suma nula de fuerzas (la de la gravedad y la que ejerce la rama). Una vez desprendida de la

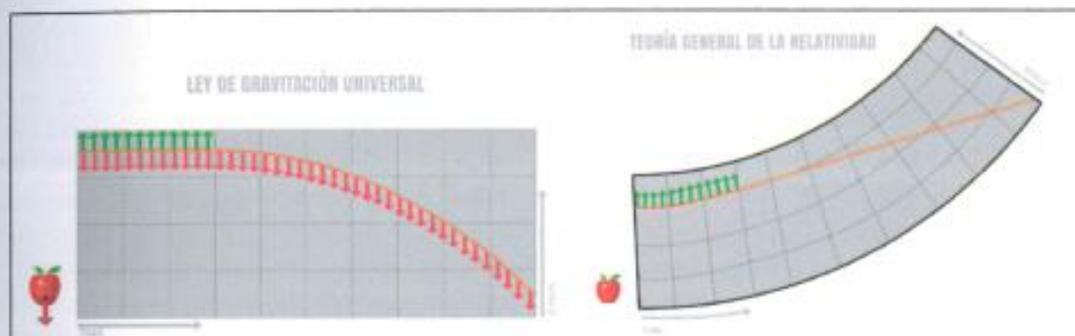


Imagen 2. Ejemplificación de las fuerzas y de la trayectoria de la manzana según la ley de la gravitación universal y la teoría general de la relatividad. En verde, la fuerza que ejerce la rama. En rojo, la fuerza de la gravedad. En marrón, la trayectoria de la manzana

rama, cae por la acción de la fuerza gravitatoria que la Tierra ejerce sobre ella (imagen 2). Por otra parte, según la teoría general de la relatividad, en ausencia de fuerzas externas las masas siguen una geodésica en el espacio-tiempo. Como la gravedad no es, desde esta conceptualización, una fuerza, solo la rama ejerce la fuerza necesaria para que la manzana no siga su camino «natural» en el espacio-tiempo curvo existente en la proximidad de la Tierra. Por ello, cuando la fuerza de la rama deja de actuar, la manzana sigue la geodésica que la lleva, en el tiempo, a «encontrarse» con la Tierra (imágenes 2 y 3). Así, la gravitación que experimentamos en la Tierra es mayoritariamente el producto de una curva en el tiempo. La simulación que aparece en www.youtube.com/watch?v=DdC0QN6f3G4 nos ayuda a visualizar esta contraintuitiva noción.

En relación con las representaciones visuales que nos pueden ayudar a explicar conceptos físicos complejos, nos gustaría destacar la necesidad de evaluar cuidadosamente las mismas, en particular para el caso de las poco intuitivas nociones de la relatividad general. Así, es común ver en los libros de texto o en artículos de divulgación que la deformación provocada por sistemas con masa

o energía en la curvatura espacio-temporal puede «asemejarse» a una sábana en tensión. Se indica en estos textos que si situásemos un objeto pesado en la sábana esta se vería deformada debido a que el objeto tiraría de ella hacia abajo. Si lanzásemos, por ejemplo, una canica sobre la sábana, esta no seguiría una trayectoria rectilínea, sino que deformaría su recorrido hacia el objeto pesado. Sin embargo, esta representación popular, aunque simple y realmente interesante para mostrar cómo los cuerpos pueden atraerse de forma indirecta a través de un tejido espacio-temporal

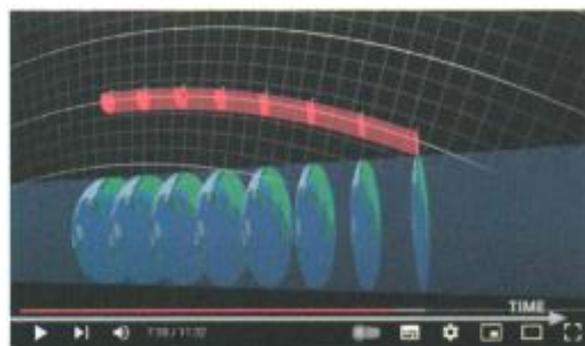


Imagen 3. Representación de las geodésicas de la manzana y de la Tierra en el tiempo, según la teoría general de la relatividad. Instantánea del video «A new way to visualize General Relativity», disponible en: www.youtube.com/watch?v=wrwgjBUYYtc

En la escuela enseñamos todavía a los niños y adolescentes que la gravedad es una fuerza que atrae

cuya geometría puede modificarse, tiene varios problemas que la hacen una representación poco rigurosa. Solo para citar alguno de ellos, induce a pensar que los objetos (que son en 3D) son colocados sobre el espacio-tiempo (que es la sábana, prácticamente en 2D) como canicas, cuando es el espacio-tiempo (con sus 4D espacio-temporal) el que contiene a esos objetos (3D). Por ello, puede llevar al alumnado a confundirlo con la representación tridimensional del potencial del campo gravitacional de la física newtoniana. En este sentido, animaciones como las que aparecen en www.youtube.com/watch?v=wrwgfjBUYVc pueden ayudarnos con estos complejos aspectos, al usar el formato de vídeo y permitirnos así abordar, de alguna manera, la dimensión temporal.

Cabe destacar que, además de las simulaciones y vídeos disponibles en YouTube, la película *Interstellar* (2014) presenta «vividios» ejemplos de lo que sabemos, suponemos y especulamos sobre cómo el universo es de acuerdo a la imagen que resulta de la teoría general de la relatividad (Thorne, 2014).

ENTONCES, ¿ESTO ES TODO?

En la escuela enseñamos todavía a los niños y adolescentes que la gravedad es una fuerza que atrae. Aunque el modelo matemático asociado con esa conceptualización sea el que van a necesitar en sus estudios futuros y con el que podemos enviar naves a Marte (dicho esto, la flota de naves espaciales necesitará cálculos de relatividad

especial para proporcionar una determinación precisa de la posición en sistemas semejantes a nuestros GPS para la navegación), estamos muy desfasados respecto de los modelos que actualmente están siendo propuestos por la comunidad científica. Hoy sabemos que más de dos tercios de lo que acelera la expansión del universo tiene gravedad repulsiva. Es decir, volviendo a nuestra manzana, si la lanzásemos en el borde del universo, se alejaría de nosotros (Chown, 2019). La propuesta que aquí presentamos pretende, al menos, reducir un poco este desajuste: un objetivo que parece ser viable en la medida en que existe material disponible para hacerlo. ◀

Referencias bibliográficas

- Chown, M. (2019): *Gravedad: Historia de la fuerza que lo explica todo*. Barcelona. Blackie Books.
- Galli, I., Bar, V. y Brosh (2016): Teaching weight-gravity and gravitation in Middle School: Testing a new instructional approach. *Science & Education*, 25, 977-1.010.
- Galli, I. y Kaplan (1996): Students' operation with the concept of weight. *Science Education*, 80, 457-487.
- LEVRINI, O. (2002): The substantialist view of spacetime proposed by Minkowski and its educational implications. *Science & Education*, 11, 601-617.
- THORNE, K. (2014): *The science of Interstellar*. Nueva York. W. W. Norton & Company.

Direcciones de contacto

Ileana M. Greca

Universidad de Burgos

imgreca@ubu.es

Irene Arriasecq

Universidad Nacional del Centro de la Provincia

de Buenos Aires (Argentina)

irenean@exa.unicen.edu.ar

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE, DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES en noviembre de 2021 y aceptado en abril de 2022 para su publicación.