



El Principio de Equivalencia: una propuesta didáctica a partir del juguete de Einstein

Giovanni Cardona Rodríguez¹, Jaime Duván Reyes¹ Eric Ortiz Ibáñez²

¹Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Carrera 3 No.26 A-40, Bogotá, Colombia.

²Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Pedagógica Nacional, Calle 72 No11-13. Bogotá, Colombia.

E-mail: gicardona@hotmail.com

(Recibido el 29 de mayo de 2014, aceptado el 17 de Octubre de 2014)

Resumen

Se presenta la construcción y análisis físico de un montaje conocido como el Juguete de Einstein evidenciando una metodología que permite revisar conceptos propios de la Mecánica Newtoniana y, a su vez, generar un acercamiento de los de secundaria al principio fundamental de la Teoría General de la Relatividad el Principio de Equivalencia. El prototipo que se propone para trabajar con los estudiantes tiene la ventaja de emplear materiales reutilizables y, además se constituye en herramienta que coadyuva en el desarrollo de procesos de pensamiento y de orden actitudinal hacia la ciencia, y en particular hacia la física. En este trabajo el estudiante se involucra en el análisis de la dinámica del dispositivo con videos de alta velocidad en el programa libre IMAGI FIJI 1.46, proceso que permite calcular la velocidad de los componentes del juguete e inferir valores de tiempos de caída no habituales en un salón de clase. Se discuten algunas implicaciones didácticas asociadas a la enseñanza de la Mecánica Newtoniana en relación con el aprendizaje activo.

Palabras clave: Enseñanza de la Mecánica, Juguete de Einstein, Principio de Equivalencia, Didáctica, Física.

Abstract

This article report the construction and physical analysis of an assembly known as the *Einstein's toy*. The methodology presented are based on Newtonian concepts and allow to generate an approach to high school students to the General Theory of Relativity and the Equivalence Principle. The prototype developed has the advantage of using reusable materials and also constitutes as a tool to develop thinking processes and attitudes toward physics. In this work students are involved in the dynamic analysis using high-speed videos through IMAGI FIJI 1.46 as a free software. The pedagogical considerations associated to active learning are considered as a part of the proposal that imply the use of the prototype in physics classes.

Keywords: Teaching Physics, Einstein's Toy, Equivalence principle, Newton mechanics, Didactic, Physics.

PACS: 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.50.Pa
9095

ISSN 1870-

I. INTRODUCCIÓN

El arreglo experimental que aquí se presenta (*El juguete de Einstein*) cautivó la atención de Einstein en 1955 por permitir evidenciar el Principio de Equivalencia. En este sentido se muestra el proceso de construcción y utilización del *juguete* de manera que pueda ser incluido en las actividades propias de la enseñanza de la Mecánica Newtoniana y a su vez genere un acercamiento a los estudiantes de secundaria al principio fundamental de la Teoría General de la Relatividad (TGR) [1].

La construcción de este montaje, y su análisis físico, puede capturar la atención de los estudiantes sobre la dinámica del sistema que le es inherente, así como posibilitar el desarrollo de competencias científicas asociadas a: la observación de un evento físico, su

respectiva descripción, la construcción de hipótesis, la capacidad de argumentación, y la generación de predicciones desde la intuición física y desde un modelo matemático. En consonancia con ésta propuesta el juguete de Einstein podría considerarse como un experimento discrepante, teniendo en cuenta que es contra intuitivo [2].

Galileo creía que todos los cuerpos que caen (graves) deben hacerlo con total independencia del valor de su masa y de algún otro parámetro externo, argumentando que los *cuerpos que caen tenían un movimiento equivalente* [3], hecho que comprobó el astronauta David Scott en la misión de la NASA Apolo 15 en 1971, dejando caer un martillo y una pluma sobre la superficie lunar observando que los dos golpeaban el suelo lunar al mismo tiempo. Al respecto, Scott afirmó que el Sr. Galileo tenía razón" [4].

Desde las ideas de Newton, la caída de los cuerpos se explica al realizar la igualdad entre la masa inercial y la

Giovanni Cardona Rodríguez, Jaime Duván Reyes Eric Ortiz Ibáñez masa gravitacional, al igualar la ley de fuerza y la ley de gravitación y asumir la igualdad entre las masas aparece una aceleración que no depende de la masa del cuerpo que cae, depende de la masa de la fuente de campo gravitacional; en este caso la Tierra [5]. Así, siempre que la masa inercial sea idéntica a la masa gravitacional, todos los cuerpos que caen presentan un movimiento de caída libre gravitatoria equivalente.

En 1905, Einstein había llegado a la Teoría Especial de la Relatividad (TER) donde plantea la equivalencia de todos los sistemas inerciales para la formulación de las leyes físicas, dejando la duda de si se cumpliría la equivalencia para los diferentes sistemas de coordenadas [2], con esto el sistema inercial ocupaba una posición privilegiada en la TER. Ante la necesidad de incluir los sistemas de referencia acelerados, Einstein inicia su trabajo enunciando el Principio de Equivalencia afirmando que los sistemas de referencia graves (acelerados) son localmente inerciales.

En suma, el principio de equivalencia ayuda a desarrollar la modelación de sistemas (tales como como cadenas cayendo). Y en este sentido, el presente informe presenta su utilización asociada a simulaciones numéricas, el uso de fotografía y cámaras de video de alta velocidad dado que en su conjunto permiten identificar la conservación de la energía [6]. Por esto, proponemos un prototipo para trabajar con los estudiantes que tiene la ventaja de emplear materiales reutilizables, además planteamos un modelo unidimensional empleando las leyes de Newton que se consideran familiares a los estudiantes de secundaria. Este proceso considera la observación minuciosa de la caída del juguete de Einstein así como la identificación del valor de algunas variables, lo cual permitió analizar un video de alta velocidad con ayuda del software libre IMAGI FIJI 1.46 [11] aspecto que contribuyó en la afinación del modelo.

II. EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

Einstein, antes de publicar el artículo de 1907, se encontraba en la oficina de patentes y realizó un experimento mental (*Gedanken*) que, en breves palabras, dice: Si una persona cae libremente, no siente su propio peso", reflexión que, años más tarde, denominó como la idea más feliz de su vida, y que se constituye en la base del Principio de Equivalencia [7]. Para la comprensión de este principio se deben desarrollar tres aspectos, la explicación de la igualdad entre la masa inercial y gravitacional, el principio débil y el principio fuerte de equivalencia.

A. Equivalencia masa inercial y masa gravitacional

Según las leyes de Newton toda masa posee una magnitud inercial y gravitacional, para esto tomemos el siguiente ejemplo: la masa gravitacional de la Tierra atrae los cuerpos de menor masa y se puede aplicar la ley de gravitación universal.

$$F = G \frac{m_t m_g}{r^2}, \quad (1)$$

Se tiene el campo gravitacional actuando sobre la masa m_g del cuerpo que está siendo atraído. Por la segunda ley de Newton, al cambiar la masa de posición presentaría una aceleración a y oposición al movimiento m_t .

$$m_t a = G \frac{m_t m_g}{r^2}, \quad (2)$$

En este caso la aceleración toma la forma:

$$a = G \frac{m_t}{r^2} \left(\frac{m_g}{m_i} \right). \quad (3)$$

Así, si los cuerpos de diferente masa caen de forma equivalente se acelerarán de la misma manera [8], por esto la aceleración no dependería de la masa, composición o forma de los cuerpos siendo $\frac{m_g}{m_i} = 1$; donde las masas

inercial y gravitacional son equivalentes pero de diferente naturaleza [8]. Aquí, podemos retomar los experimentos de Eötvös quien concluye que la razón $\frac{m_g}{m_i}$ para la madera y el platino era menos de 10^{-19} [1].

B. Principio de equivalencia débil

La idea fundamental del principio de equivalencia débil es: cuando un objeto cae libremente, localmente no sentirá su peso, se comportará igual que en el espacio libre de gravitación. Si una masa se encuentra en un espacio libre de gravitación localmente sentirá los mismos efectos como si se encontrara en caída libre bajo influencia de un campo gravitacional [9].

Al respecto, Einstein desarrolló un experimento mental que se puede presentar de la siguiente manera: Si un observador estuviese encerrado en un caja o ascensor sin ventanas y quisiera desarrollar un experimento para distinguir en cuales condiciones físicas se encuentra: sí en caída libre o en el espacio en ausencia de gravitación, no encontraría experiencia que le ayude a diferenciar los dos sistemas físicos [6].

La igualdad de masa gravitacional y la masa inercial garantiza que los cuerpos se aceleran de igual manera en caída libre (ecuación 3), bajo el mismo campo gravitacional, entonces los cuerpos caen paralelamente igual y en el espacio los cuerpos tienen un estado de ingravidez y flotarán de la misma manera.

El principio débil desarrolla la equivalencia entre un sistema en caída libre y un sistema en ausencia de gravedad, por lo tanto para un observador que se encuentre en caída libre bajo la influencia de un campo gravitacional, las ecuaciones que expresan las leyes de la física son las mismas que se cumplirían en ausencia de gravitación.

C. Principio de Equivalencia Fuerte

El principio fuerte desarrolla la equivalencia entre un sistema acelerado y un campo gravitacional, se asumirá por completo la equivalencia física de un campo gravitatorio y la aceleración [8]. Todo sistema de referencia grave es localmente inercial.

III. DESCRIPCIÓN DEL JUGUETE DE EINSTEIN

El juguete aparece cuando el profesor Eric Rogers se lo obsequió a Einstein en su cumpleaños número setenta y seis mientras vivían en Princeton. Rogers acostumbraba regalar acertijos a Einstein, en este caso el acertijo estaba representado en un dispositivo que Rogers había creado a partir de una variante de un juguete para niños [chun wam].

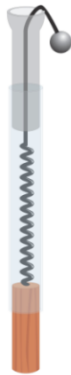


FIGURE 1. Prototipo del Juguete de Einstein diseñado por Eric Rogers en 1955.

El juguete que regaló Rogers a Einstein consistía de una bola de metal atada a un hilo y todo dentro de un globo transparente. En el centro del globo había una copa, también transparente, en la cual debería depositarse la bola de metal. Inicialmente, la bola estaba fuera de la copa y el hilo se pasaba por ella, y luego por un tubo central transparente. Debajo del globo, el hilo se ataba a un resorte, largo y débil, protegido por otro tubo transparente que terminaba en un trozo de madera cilíndrico. El problema consistía en si la bola cuelga fuera de la copa, se debe conseguir meterla en ella con un método absolutamente seguro en contraste con el resultado que se tendría agitando el trozo de madera al azar [7]. Esta es la solución al problema dada por Einstein: “Ahora lo dejaré caer y de acuerdo al principio de equivalencia no habrá fuerza gravitacional. El resorte será lo suficientemente fuerte para llevar a la bolita dentro del tubo de plástico” [7].

A. Prototipo didáctico

El prototipo que proponemos para trabajar con los estudiantes tiene la ventaja de emplear materiales reutilizables, los cuales son: una caja para discos compactos

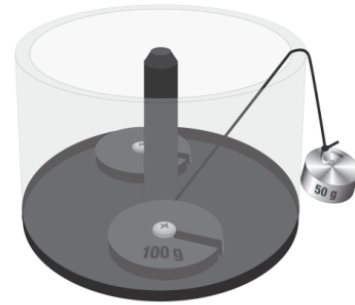


FIGURE 2. Prototipo didáctico del Juguete de Einstein, en el fondo de la caja se fijan pesas para evitar que el sistema rote mientras cae.

La construcción consiste en retirar la tapa superior de la caja y atar la banda elástica a la parte inferior, al otro extremo de la banda se fija una masa en este caso de 50g la cual denominaremos masa de prueba, se recomienda que la longitud de la banda no exceda el borde de la caja y que la elongación de ésta se deba a la deformación generada por el peso de la masa de prueba.

Teniendo los juguetes construidos se plantea el reto a los estudiantes de llevar con éxito la masa de prueba dentro de la caja sin tener contacto directo con esta y sin mover al azar la caja de compactos, los más osados plantearán usar un imán cuando la masa es metálica; respuesta que se puede controvertir cambiando el material de la masa de prueba.

Después de revisar las posibilidades planteadas por los estudiantes el profesor resuelve el acertijo dejando caer libremente el juguete. Al revelar la solución se pueden plantear las siguientes preguntas:

1. ¿Qué pasa con el peso de la masa que esta fuera de la caja mientras el sistema cae?
2. ¿Qué sucede a la masa que está por fuera de la caja si se lanza hacia arriba el juguete?
3. ¿Qué sucede si se cambia la banda elástica por una cuerda?
4. ¿Qué sucede si la masa de prueba se cambia por una mayor o menor?

La primera pregunta busca que el estudiante identifique que el peso de la masa de prueba se anula con respecto a la caja cuando el sistema cae. Cuando se lanza hacia arriba el sistema, el peso de la masa de prueba aumentará y se genera más elongación en la cinta elástica. En el caso de cambiar la cinta elástica por una cuerda sin la propiedad de restitución se puede predecir que la masa de prueba nunca va dentro de la caja, cuando se cambian las masas se espera que el estudiante identifique la dependencia con la masa (Principio débil), el profesor podrá formular más preguntas, por ejemplo para el caso de la constante del resorte se puede recordar la ley de Hooke.

Se espera que estas preguntas sean importantes y significativas para el estudiante y que ayuden en su aprendizaje [10], así mismo que permitan la generación de otros cuestionamientos. Al generar las respuestas con la

Giovanni Cardona Rodríguez, Jaime Duván Reyes Eric Ortiz Ibáñez
 orientación del profesor los estudiantes podrán describir el sistema, hacer hipótesis, argumentar, y desde un modelo matemático generar una explicación física satisfactoria.

Parte de esa explicación se presenta a continuación.

A. Trabajo con el juguete: observación y modelo

A continuación se presenta una explicación del juguete desde la Mecánica Newtoniana, la observación y descripción cinemática del juguete cayendo se logró realizar al analizar un video del evento con ayuda del software libre IMAGI FIJI 1.46 [11].

A1. Modelo cinemático con ayuda de IMAGI FIJI

Después de convertir el video a un formato de imagen, se importó a FIJI para implementar el proceso Imagin, Transform, Rotate y la propiedad Straight para determinar longitudes.

La longitud de caída de la caja es de 129 pixeles para la cual la masa de prueba (figura 3) está dentro del orden de 18,5 cm empleando el factor de conversión es 0,144 cm por cada pixel, factor establecido a partir de la altura de la caja (8,5 cm) y su conversión a la longitud de la caja en el programa (59 pixeles).

Con esta longitud se pudo estimar el tiempo que se demora la masa de prueba en estar dentro de la caja cuando

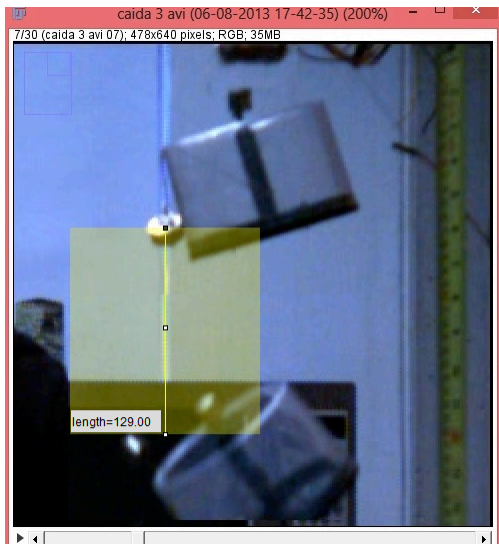


FIGURE 3. Imagen de IMAGI FIJI, donde se puede determinar la longitud de caída de la caja para la cual la masa de prueba se introduce.

la caja se modela con la ecuación de caída libre $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$, el

tiempo de caída involucrado es del orden de 0,19 s, tiempos no medibles habitualmente en un salón de clase.

La caída de la caja se puede modelar como un movimiento con aceleración constante y emplear la ecuación $v = \sqrt{2gy}$ para estimar su velocidad, que para el

caso es $v = 1,8 \frac{m}{s}$. Esta velocidad se puede comparar con la arrojada al ejecutar la tarea Plugins-Tracking pero aclarando el manejo de error.

La longitud que se ha desplazado la caja (18,5 cm) es del orden de dos veces su altura (8,5 cm) para el tiempo estimado, mientras que para el mismo tiempo la masa de prueba solo se ha desplazado la distancia que corresponde a la deformación de la banda que es menor a la altura de la caja, hecho que permite evidenciar la pérdida de peso de la masa de prueba.

A2. Modelo dinámico del juguete

El modelo que planteamos es un modelo unidimensional mediante las leyes de Newton, advirtiendo que también existen análisis desde la conservación de la energía o formulación lagrangiana [6]. Teniendo en cuenta el diagrama de cuerpo libre para la masa de prueba, y despreciando todo tipo de fricción, se tiene para el juguete en reposo que $T_y = k\Delta x \cos \alpha$ donde k es la constante del resorte y Δx la deformación, de manera que:

$$k\Delta x \cos \alpha = w. \quad (4)$$

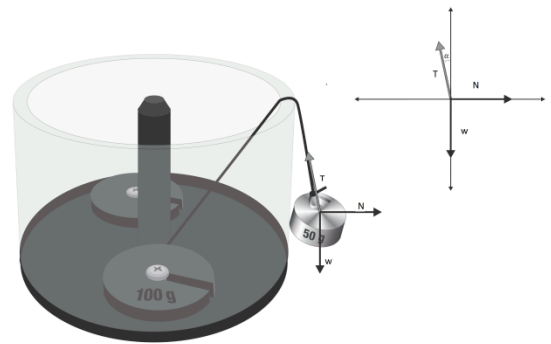


FIGURA 4. Juguete en reposo, fuerzas que afectan sobre la masa de prueba.

Ahora bien, cuando el juguete cae la masa de prueba pierde su peso con respecto a la caja y el resorte es lo suficientemente fuerte para llevar la masa dentro de la caja, es decir que:

$$k\Delta x \cos \alpha > w.$$

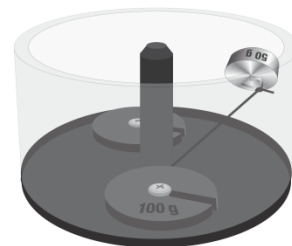


FIGURA 5. Juguete cayendo, la masa de prueba se introduce en el recipiente.

En este caso las fuerzas en magnitud se relacionan:

$$k\Delta x \cos \alpha - w = -ma,$$

$$k\Delta x \cos \alpha = w - ma,$$

$$\frac{k\Delta x \cos \alpha}{m} = g - a.$$

Cuando $g = a$, $\Delta x = 0$ y $\alpha = 90^\circ$ el resorte recupera su longitud natural y la masa de prueba estará dentro de la caja (ver Figura 5).

IV. CONCLUSIONES

El principio de equivalencia regula las explicaciones físicas de sistemas en caída, en particular para el caso del proyecto del juguete de Einstein del cual aquí se presentó un prototipo funcional.

La enseñanza de la física desde una perspectiva activa, permite a los profesores y estudiantes la generación de preguntas sobre la dinámica del sistema.

El prototipo desarrollado forma parte de una propuesta didáctica que involucra el uso de las TIC, en particular el software libre y las cámaras de video, herramientas disponibles hoy en día y de fácil acceso en las instituciones educativas.

Es posible desarrollar explicaciones físicas mediante la modelación del comportamiento del juguete de Einstein en un nivel unidimensional.

REFERENCIAS

- [1] Weinberg, S., *Gravitation and cosmology: principles and applications of the General Theory of Relativity*, (John Wiley & Sons, USA, 1972).
- [2] Talero, P. & Barbosa, L., *Botellas equilibradas: Extracción discrepante de un billete desde la boca de dos botellas verticales invertidas*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **3**, 433-438 (2009).
- [3] Ortiz Ibañez, E. R., *El juguete de Einstein: una experiencia que permite evidenciar el Principio de Equivalencia en el aula*, Universidad Pedagógica Nacional, Facultad de Ciencia y Tecnología, Departamento de Física, Tesis de licenciatura, Bogotá (2013).
- [4] Barry, P., *Equivalence principle*, National Aeronautics and Space Administration (2007). Consultado el 2 febrero 2013 de: <http://ciencia.nasa.gov/scienceatnasa/2007/18mayequivalenceprinciple/>.
- [5] Serway, R. A. & Jewett, J. W., *Física para Ciencias e Ingenierías*, 6ta Ed. (Thomson, USA, 2005).
- [6] Wong, C., Youn, S. & Yasui, K., *Two falling-chain demonstrations based on Einstein's equivalence principle*, (Univ. California, Dept. Physics and Astronomy, USA, 2006).
- [7] Peña, L., *La idea más feliz de mi vida*, En: Albert Einstein: navegante solitario, 3a Ed. (Fondo de Cultura Económica, México, 2003).
- [8] Tejeiro Sarmiento, J. M., *Notas de Clase*, (Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Bogotá, 2005).
- [9] Einstein A., *Notas sobre el origen de la Relatividad General*, En: Einstein, A., Sobre la Teoría de la Relatividad y otras aportaciones científicas, (Sarpe, Madrid, 1983).
- [10] Barbosa, L., *Los experimentos discrepantes en el aprendizaje activo de la Física*, Latin-American Journal of physics Education **3**, 246-252 (2008).
- [11] Schindelin, J., *Fiji: an open-source platform for biological-image analysis*, Nature methods **9**, 676-682 (2012).