

¿Cómo deja de fluir un chorro de agua de un recipiente en caída libre?

Jasmina Balukovic¹, Josip Slisko^{2,a}, Adrián Corona Cruz²

¹Facultad de Ciencias. Universidad de Sarajevo. Bosnia y Herzegovina.

²Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla. México.

^ajosipslisko47@gmail.com

[Recibido en marzo de 2015, aceptado en julio de 2015]

Es bien conocido que un chorro de agua, que fluye de un recipiente perforado que está en reposo, deja de fluir si el recipiente se deja en caída libre. En este artículo, se describe en detalle este fenómeno. Para lograr ese fin, hemos montado a una plataforma un recipiente transparente, del que fluye un chorro de agua, y una cámara que puede realizar vídeograbaciones. Cuando se deja caer libremente la plataforma, se observa cómo desaparece el chorro inicial. Se describen los fenómenos observados durante el proceso de caída y se explican en forma cualitativa. Se sugieren posibles usos didácticos de las fotos capturadas para promover el aprendizaje activo de la física.

Palabras clave: Ingravedez. Caída libre. Videoanálisis. Movimiento inercial. Tensión superficial. Aprendizaje activo.

How does a water jet stop to flow out from a free-falling can?

It is well known that a water jet, flowing out from a vessel with a hole that is in rest, stops to flow out if the vessel is in free fall. In this article, we describe a few interesting details of that cease of jet's flow out. To carry out that aim, we have set up on a platform a transparent vessel, from which a water jet flows, and a camera that can do video-recordings. When the platform is leaved to fall freely, it was possible to film the details of how the initial jet disappears. Various observed phenomena are described and commented. These phenomena are explained in a qualitative manner, using physics concepts. Possible didactic uses of the captured photos promoting active physics learning are suggested.

Keywords: Weightlessness. Free fall. Video analysis. Inertial motion. Surface tension. Active learning.

Introducción

El comportamiento poco común de los astronautas y diferentes objetos en las naves espaciales, gracias a numerosos vídeos de la NASA y otras agencias espaciales disponibles en YouTube, se hizo parte de la cultura visual contemporánea. Como ejemplos ilustrativos se pueden mencionar, el comportamiento de una esfera de agua causado por diferentes acciones externas y el de la llama de una vela, entre otros (NASA 2012).

Esos fenómenos se toman como evidencias de que tanto agua y astronautas como llamas de vela están en el «estado de ingravedez». Sin embargo, la interpretación de tal concepto es controvertida, pues depende de cómo se define el concepto de peso. Las dos maneras principales son la «gravitacional» y la «operacional» (Galili 1995).

Si el peso de un cuerpo se define como la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra (u otro planeta) sobre el cuerpo, entonces, se trata de «ingravedez aparente». Aunque el cuerpo y la nave están bajo la influencia de la gravitación terrestre, el cuerpo en la nave espacial, en caída libre, se comporta como si su «peso aparente» (la fuerza de contacto que ejerce, por ejemplo, sobre una balanza) fuera cero.

Si, por otro lado, el peso se define, de manera operacional, como la fuerza con que el objeto presiona la balanza, entonces los cuerpos en la nave espacial, estando todos en caída libre, no pueden ejercer tal fuerza de presión y se encuentran en el estado de «ingravedez real». Los

libros de texto de física, en su gran mayoría, tratan los fenómenos relacionados con la ingravidez (sea aparente o real) en el contexto de ejemplos donde intervienen satélites en órbita o usando «experimentos pensados», en los que, por ejemplo, una persona mide su peso mediante una balanza en un elevador, que, por desgracia, se encuentra en la caída libre (Cutnell y Johnson 2004, Giancoli 2006, Walker 2007, Young y Freedman 2008).

De tal manera, los estudiantes no pueden tener las experiencias sensoriales de esos interesantes fenómenos y las oportunidades múltiples para crear, revisar y mejorar sus propios esquemas explicativos. En consecuencia, su comprensión conceptual de ingravidez es superficial y plagada de concepciones erróneas (Carrascosa Alís 2005). Esta situación se podría superar usando una variedad de diseños didácticos del aprendizaje activo (Meltzer y Thornton 2012) en los que los estudiantes activan sus modelos mentales y comparan sus consecuencias con las características observables de los fenómenos físicos en cuestión.

La postura de los autores de libros de texto de física de contextualizar los fenómenos relacionados con la ingravidez en situaciones que son inalcanzables para los estudiantes es sorprendente. La razón de la sorpresa es el hecho de que, desde hace mucho tiempo, se han publicado, en revistas orientadas hacia enseñanza y aprendizaje de la física, un gran número de demostraciones del concepto de ingravidez en situaciones de caída libre. Diversos autores propusieron demostraciones que pueden ser realizadas fácilmente en el aula (Kruglak 1962, Kruglak 1963, Chakarvarti 1978, Smith 1989, Vogt y Wargo 1992, LaCombe y Koss 2000).

El chorro de agua que deja de salir de un recipiente en caída libre

Una de las exposiciones más sencillas del fenómeno de ingravidez en sistemas en caída libre consiste en demostrar que un chorro de agua, saliendo a través de un orificio perforado en la pared lateral de un recipiente, deja de fluir cuando el recipiente esté tanto en caída (Kruglak 1963, Vogt y Wargo 1992, Marshall 2003, Feantonby 2011) como en subida libre (Corona *et al.* 2006).

La demostración, generalmente, tiene dos partes. En la primera, se sostiene en reposo el recipiente (por ejemplo, una botella transparente) perforado y lleno de agua. Los estudiantes observan que el chorro sale del recipiente siguiendo una trayectoria parabólica como la observada en un tiro horizontal (figura 1).

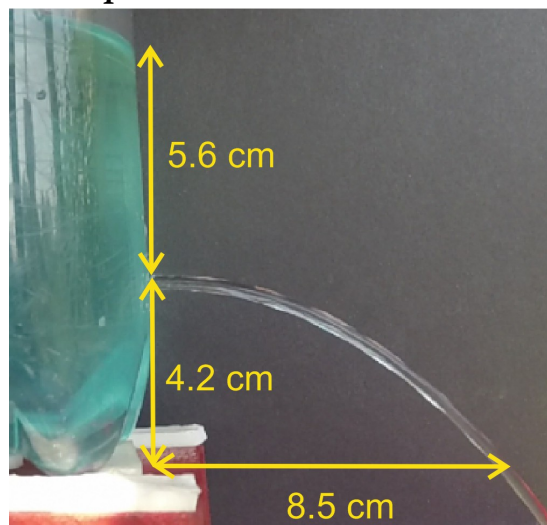


Figura 1. El chorro de agua sale de una lata transparente perforada en reposo. Los valores de las distancias relevantes se han agregado en la fotografía.

Para la discusión que viene después, es importante estimar el valor de la velocidad de salida del chorro. En el ejemplo presentado aquí, el nivel del agua respecto al orificio por el que sale el chorro al momento de la fotografía es de $h=5.6$ cm, por lo tanto, el valor teórico de la velocidad de salida del agua, calculado según la fórmula de Torricelli es $v_{\text{teo}}=1.05$ m/s. Este valor coincide razonablemente bien con el valor experimental $v_{\text{exp}}=0.92$ m/s, obtenido a partir de las características geométricas del chorro medidas en la fotografía.

Conociendo la altura del orificio, $y=4.2$ cm, y el alcance horizontal del chorro en el nivel de la base de la lata, $x=8.5$ cm, el valor experimental de su velocidad de salida se calcula según la fórmula $v_{\text{exp}}=x\sqrt{g/(2y)}$.

Con el valor local de la aceleración de caída libre igual a $g = 9.78 \text{ m/s}^2$, el valor experimental de la velocidad de salida resultó ser 0.917 m/s^2 .

En seguida se deja de sostener el recipiente y éste cae libremente. Los estudiantes pueden observar que el chorro deja de salir.

Este fenómeno, muy sorprendente para muchos estudiantes, se puede explicar de dos diferentes maneras.

Para un observador inercial (situado en el suelo), el agua y el recipiente están en caída libre, bajo la influencia de la fuerza gravitacional. Al caer de la misma manera, el agua a la altura del orificio no experimenta la presión de la columna de agua por encima de ella y por lo tanto no presenta ninguna tendencia a ser expulsada del recipiente. En consecuencia, no puede ejecutar un movimiento horizontal y el chorro lateral no se forma.

Para un observador no inercial (situado en el recipiente y que está en la caída libre), en el sistema que cae el campo gravitacional inducido (debido al principio de equivalencia) «cancela» el campo gravitacional externo. De tal manera, en el sistema que cae el campo gravitacional efectivo se vuelve cero. En consecuencia, el agua no tiene peso y no es capaz de ejercer la presión hidrostática. En resultado es que el agua no sale del recipiente en forma de chorro.

El uso de vídeo en la enseñanza y el aprendizaje de la física

Sabiendo la importancia de diferentes modos de representación de los conceptos y fenómenos en la construcción de conocimiento, recientemente el aprendizaje basado en multimedia se ha vuelto una fuerte corriente en la educación (Mayer 2005). Los elementos de multimedia pueden ayudar a que los fenómenos físicos se presentan en la enseñanza de la física de una manera motivante e informativa, dándoles a los estudiantes la oportunidad de analizarlos con más detalles y aprenderlos mejor. Hace una década, se pudo encontrar en la red (entre vídeos, experimentos interactivos en la pantalla, simulaciones y animaciones generadas por el ordenador) al menos 5000 de multimedia que podrían usarse en la enseñanza de la física (Alther *et al.* 2004). Últimamente, se evalúan experimentalmente sus efectos verdaderos en el aprendizaje de la física de los estudiantes (Sadaghiani 2011, Zacharia y Olympiou 2011, Sadaghiani 2012, Jian-hua 2012, Najafipour *et al.* 2013).

Los modos didácticos de emplear los vídeos en la enseñanza de la física y sus diversos efectos en el aprendizaje que logran los estudiantes se han investigado ampliamente (Zollman y Fuller 1994, Beichner 1996, Rodrigues *et al.* 2001, Yeo *et al.* 2004, Kearney 2004, Climent 2009, Martínez *et al.* 2012). La mayoría de los resultados indican que la interacción de los estudiantes con los vídeos beneficia la comprensión de los conceptos y las leyes de física.

Últimamente, la caída de precios de las cámaras que tienen posibilidad de grabar vídeos a una alta velocidad y reproducirlos a cámara lenta dio un fuerte empujón a su uso en la enseñanza de la física. Tal uso permite una observación apropiada de los fenómenos que ocurren a ritmo demasiado rápido para que el ojo humano pueda notar los detalles importantes. De tal manera, es posible analizar cualitativa y cuantitativamente muchos fenómenos, desde los comunes, como son la explosión de un globo y la ruptura de un espagueti (Vollmer y Möllmann 2011a) hasta los que son menos conocidos (Vollmer y Möllmann 2012) y los que pueden, a primera vista, parecer mágicos (Vollmer y Möllmann 2011b).

El experimento: dispositivo experimental y resultados

Para filmar los detalles finos de cómo cesa la salida del chorro de un recipiente en la caída libre, hemos usado una cámara rápida atada a la plataforma en que se encontraba un recipiente transparente de refresco de la que salían los chorros (figura 2).

El volumen del recipiente era de 350 ml. Al recipiente se le hizo una perforación (diámetro de $1/8$ de pulgada = 0.32 cm), 3.5 cm por arriba de su base. Para tener el chorro más visible, el agua se tiñó con gotas de colorante para alimentos de color azul o verde.

El comportamiento del chorro en la caída libre se grabó con una cámara marca GoPro, modelo Hero3⁺. En el modo de vídeo, la cámara captura a razón de 60 fotogramas por segundo.

Para guiar la caída libre de la plataforma se utilizó un sistema de hilos de nilón dispuestos verticalmente como indica la figura 2.



Figura 2. La plataforma con la cámara y el recipiente con el agua azul de la que sale un chorro.

Con este sistema se realizaron varios ensayos independientes. En las secuencias de las fotos capturadas se observaron diferentes eventos interesantes que se describen y explican a continuación. En la secuencia seleccionada de las fotos, que sirven para evidenciar esos eventos, el agua en el recipiente transparente fue de color verde.

La fase del chorro continuo

En los primeros instantes de la caída libre, el chorro todavía está saliendo y se mantiene continuo. De esta forma, se establece el hecho de que el chorro de agua no deja de fluir de inmediato (figura 3).

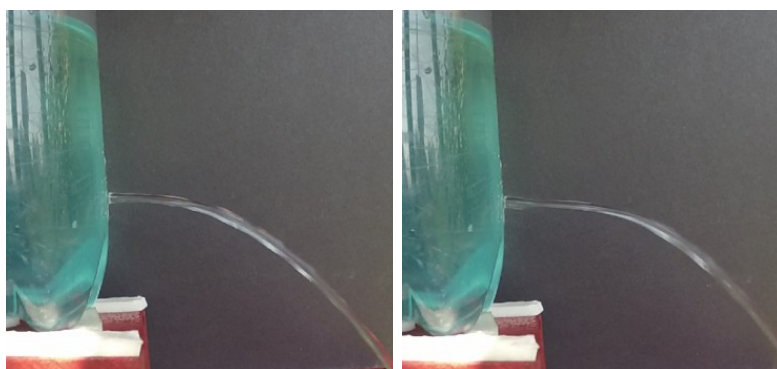


Figura 3. Forma del chorro en los instantes $1/60$ y $2/60$ segundos después del comienzo de la caída libre.

¿Por qué ocurre eso? El agua próxima al orificio no puede parar en el instante en que el recipiente, junto con la plataforma y la cámara, inicia su caída libre. Por lo tanto, continúa con su movimiento inercial, saliendo y formando el chorro. Sin embargo, se nota que ahora (en la caída libre) la parte horizontal del chorro se alarga, en comparación con la longitud que tenía cuando el recipiente estaba en

reposo (figura 1). Por otra parte, la parte curva del chorro conserva su forma. Ese comportamiento se debe a la ausencia efectiva del campo gravitacional en el sistema no inercial en que la lata está en reposo.

La fragmentación del chorro

En la siguiente fase de la caída libre, la parte horizontal del chorro comienza a fragmentarse (figura 4). La parte curva del chorro es íntegra y, como ya se ha dicho, mantiene su forma. La parte del chorro cerca del orificio es todavía «activa» y su forma está cambiando.

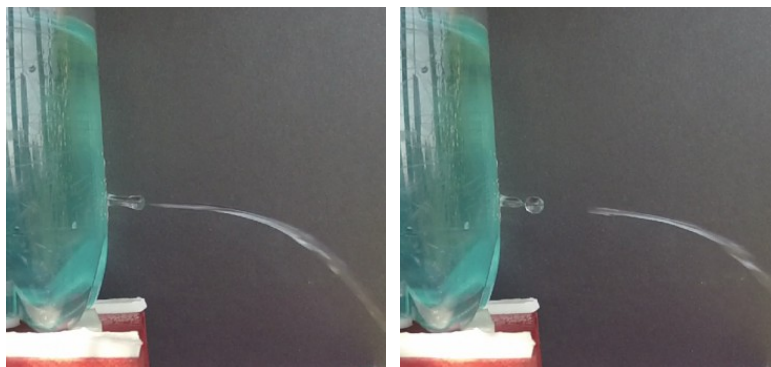


Figura 4. Fragmentación del chorro en la caída libre en los instantes 3/60 y 4/60 segundos después del comienzo de la caída libre.

La causa de la fragmentación es que el agua que sale del recipiente en la caída libre lo hace a una velocidad considerablemente menor que la velocidad de salida anterior (0.92 m/s). Tal velocidad de salida no es suficiente para mantener la continuidad de la parte horizontal del chorro.

La parte curva del chorro se desplaza en la dirección horizontal. En otras palabras, tal parte del chorro no está cayendo con respecto a la lata, sino que se aleja horizontalmente del recipiente, manteniendo su forma.

En la parte horizontal del chorro que quedó cerca de la lata se nota la formación de un cilindro (remanente de la parte horizontal del chorro) y una gota esférica en el extremo. Ambos deben su forma a la tensión superficial.

Los tres fragmentos del chorro

En la siguiente fase, las tres partes del chorro inicial están completamente separadas (figura 5). Es interesante notar que, en esta etapa, la parte cilíndrica del chorro regresa a la lata y desaparece, debido a la acción de la tensión superficial. Éste es el momento en que el agua finalmente deja de salir de la lata. Esto ocurre 7/60 segundos después del comienzo de la caída libre. Mantienen su presencia la parte curva del chorro y la parte del chorro que tomó la forma esférica (figura 6).



Figura 5. Tres partes del chorro están completamente separadas. La primera y la segunda imagen corresponden a los instantes 5/60 y 6/60 segundos después del comienzo de la caída libre.

Figura 6. El agua ya no sale del recipiente.

Movimiento de la esfera de agua formada por una parte del chorro inicial

Al final, dentro del «campo de visión» de la cámara, queda solamente la parte esférica del chorro inicial que se fragmentó. Las cuatro tomas, en diferentes momentos, demuestran que

esa esfera de agua se aleja de la botella a rapidez constante en la dirección horizontal (figura 7). El valor de la velocidad horizontal es de 0.12 m/s.



Figura 7. Posiciones horizontales de la esfera de agua en los instantes 8/60, 9/60, 10/60 y 11/60 segundos después del comienzo de la caída libre.

Como ya se ha dicho, en el sistema no inercial no existe el campo gravitacional efectivo. De esta forma, la esfera de agua conserva su velocidad inicial y ejecuta un movimiento rectilíneo con respecto al recipiente. Para un observador inercial (una cámara de vídeo ligada al suelo), su movimiento sería mucho más complicado. Se observaría un movimiento de caída libre en dirección vertical y un movimiento con velocidad constante en la dirección horizontal.

Conclusiones

Las cámaras modernas pueden registrar fotogramas con una alta velocidad. Esa característica ayuda a conocer los detalles interesantes de los fenómenos conocidos que no se perciben a simple vista.

En este artículo hemos presentado los detalles del comportamiento del chorro que estaba saliendo de la lata, al dejar caer la plataforma con la lata. En el sistema no inercial, ligado al recipiente, el chorro que salió y sus fragmentos se mueven en la dirección horizontal. Tal comportamiento se explica usando el principio de equivalencia: en el interior del sistema que cae en un campo gravitacional externo no existe el campo gravitacional interno. El chorro está en el estado de ingravidez y su movimiento es inercial (a velocidad constante).

Las fotos capturadas y presentadas en este artículo son idóneas para promover el aprendizaje activo de la física de ingravidez. Se puede proceder de dos maneras. Una manera sería presentar a los estudiantes la secuencia ordenada de las fotos y asignarles las siguientes tareas:

1. Notar y describir con precisión todos los detalles que consideran importantes;
2. Explicar, usando los conceptos y leyes de física, por qué ocurren tales detalles en el chorro que sale de la lata en la caída libre.

Otra manera sería presentar a los estudiantes las fotos desordenadas y asignarles la tarea de darles a las fotos un orden temporal (orden en que se tomaban las fotos, desde la primera hasta la última). No sobra decir que los estudiantes deben ofrecer las razones que usaban para ordenar las fotos en el tiempo.

Referencias

- Altherr S., Wagner A., Eckert B., Jodl H. J. (2004) Multimedia material for teaching physics (search, evaluation and examples). *European Journal of Physics* 25 (1), 7-14.
- Beichner R. J. (1996) The impact of video motion analysis on kinematics graph interpretation skills. *American Journal of Physics* 64 (10), 1272-1277.

- Carrascosa Alís J. (2005) El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (Parte I). Análisis sobre las causas que la originan y/o mantienen. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 2 (2), 183-208.
- Chakarvarti S. K. (1978) A demonstration on weightlessness. *The Physics Teacher* 16 (6), 391.
- Climent Á. L. T. (2009) Creación y utilización de vídeo digital y TICs en física y química. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 6 (3), 440-451.
- Corona A., Slisko J., Planinsic G. (2006) Freely rising bottle of water also demonstrates weightlessness. *Physics Education* 41 (3), 208-209.
- Cutnell J. D., Johnson K. W. (2004) *Physics*, 6th ed. New York. John Wiley & Sons. pp. 94-95.
- Featonby D. (2011) Stopping the water flow from a bottle. *Physics Education* 46 (5), 362.
- Galili I. (1995) Interpretation of students' understanding of the concept of weightlessness. *Research in Science Education* 25 (1), 51-74.
- Giancoli D. C. (2006) *Física. Principios con aplicaciones*. 6ª ed. Naucalpan de Juárez, México. Pearson Educación. p. 124.
- Jian-hua S. (2012) Explore the effective use of multimedia technology in College Physics Teaching. *Energy Procedia* 17, 1897-1900.
- Kearney M. (2004) Classroom use of multimedia-supported predict-observe-explain tasks in a social constructivist learning environment. *Research in Science Education* 34 (4), 427-453.
- Kruglak H. (1962) Demonstrations of weightlessness. *American Journal of Physics* 30 (12), 929-930.
- Kruglak H. (1963) Physical effects of apparent "weightlessness". *The Physics Teacher* 1 (1), 34-35.
- LaCombe J. C., Koss M. B. (2000) The make-it-yourself drop-tower microgravity demonstrator. *The Physics Teacher* 38 (3), 143-146.
- Marshall R. (2003) Freefall and weightlessness. *Physics Education* 38(2), 108-108.
- Martínez Á. E., González I. I., Pérez M. D. (2012) Análisis experimental de magnitudes físicas a través de vídeos y su aplicación al aula. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 9 (2), 252-264.
- Mayer R. E. (ed.) (2005) *The Cambridge handbook of multimedia learning*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Meltzer D. E., Thornton R. K. (2012) Resource letter ALIP-1: Active-learning instruction in physics. *American Journal of Physics* 80 (6), 478-496.
- Najafipour M., Rizi C. E., Ghasemi M., Ghorbani S. (2013) The study of the effectiveness of using the researcher-made multimedia software on the quality of learning physics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 83, 238-241.
- NASA (2012) [Amazing Experiments with Water in Zero Gravity](#).
- Rodrigues S., Pearce J., Livett M. (2001) Using video analysis or data loggers during practical work in first year physics. *Educational Studies* 27 (1), 31-43.
- Sadaghiani H. R. (2011) Using multimedia learning modules in a hybrid-online course in electricity and magnetism. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 7 (1), 010102 (7 pp.).

- Sadaghiani H. R. (2012) Controlled study on the effectiveness of multimedia learning modules for teaching mechanics. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 8 (1), 010103 (7 pp.).
- Smith C. J. (1989) Weightlessness for large classes. *The Physics Teacher* 27 (1), 40-41.
- Vogt G. L., Wargo M. J. (eds.) (1992) *Microgravity: A Teacher's Guide with Activities*. Washington, D.C. National Aeronautics and Space Administration.
- Vollmer M., Möllmann K. P. (2011a) Exploding balloons, deformed balls, strange reflections and breaking rods: slow motion analysis of selected hands-on experiments. *Physics Education* 46 (4), 472.
- Vollmer M., Möllmann K. P. (2011b) Ring falling into a chain: no magic – just physics. *The Physics Teacher* 49 (6), 335-337.
- Vollmer M., Möllmann K. P. (2012) Oscillating droplets and incompressible liquids: slow-motion visualization of experiments with fluids. *Physics Education* 47 (6), 664-679.
- Walker J. S. (2007) *Physics*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ. Pearson/Prentice Hall. p. 126.
- Young H. D., Freedman R. A. (2008) *Sears and Zemansky's University Physics*, 12th ed., Vol. 1. San Francisco. Pearson/Addison Wesley. p. 145.
- Zacharia Z. C., Olympiou G. (2011) Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning. *Learning and Instruction* 21 (3), 317-331.
- Zollman D., Fuller R. (1994) Teaching and learning physics with interactive video. *Physics Today* 47 (4), 41-47.
- Yeo S., Loss R., Zadnik M., Harrison A., Treagust D. (2004) What do students really learn from interactive multimedia? A physics case study. *American Journal of Physics* 72 (10), 1351-1358.