
Movimiento superlumínico y viajes en el tiempo en *El Estudio* (Centro Cultural de la Ciencia, Buenos Aires)

Sebastián I. Arroyo *Universidad Nacional de Quilmes*

Damián H. Zanette *Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro*

18 de febrero de 2016

Según la Teoría de la Relatividad, ningún objeto material puede moverse a velocidad igual o mayor que la de la luz ($c \approx 300\,000$ km/s). Por pequeña que sea su masa, la posibilidad de que la velocidad de una partícula alcance y/o supere c es incompatible con las leyes de la dinámica y, peor aún, viola el principio de causalidad.¹

Sin embargo, la Relatividad no prohíbe que “cosas” que no son objetos materiales tengan velocidades superlumínicas. El artículo de M. A. Rothman, “*Things that go faster than light*” (“Cosas que se mueven más rápido que la luz”, *Scientific American*, Jul. 1960), es quizás la recopilación más antigua de ejemplos de este tipo. En los párrafos introductorios menciona que la mancha luminosa producida sobre una pantalla suficientemente lejana por un haz de luz cuya dirección cambia bruscamente, puede moverse a velocidad mayor que c . Cuando la mancha se mueve no conlleva el desplazamiento de ninguna partícula

¹Según la Relatividad, para acelerar una partícula material hasta la velocidad de la luz sería necesario entregarle una cantidad infinita de energía. Si la superara, sería posible utilizar la partícula para establecer una relación causal entre eventos cuyo ordenamiento temporal depende del sistema de referencia desde el que se los observa.

sobre la pantalla, de modo que no hay incompatibilidad con la teoría. Hoy en día, cientos de páginas de internet discuten, con mayor o menor detalle y acierto, qué ocurre al iluminar la Luna con un láser rotante. Basta una rotación de apenas 60° por segundo, que lograríamos sin dificultad sosteniendo el láser con la mano, para que la mancha luminosa sobre la superficie lunar se mueva considerablemente más rápido que la luz.

Si bien en el experimento del láser sobre la Luna no hay ningún objeto material con velocidad mayor que c , el movimiento de la mancha luminosa ciertamente coincide con el que podría tener una partícula superlumínica si la física relativista lo permitiera. Un astrónomo que a través de su telescopio siguiera a la mancha en su travesía lunar, estaría observando una representación realista del desplazamiento de esa partícula. En otras palabras, la mancha luminosa del láser resulta ser un *modelo* de movimiento superlumínico, en este caso, realizado sobre la superficie de la Luna.

En esta nota describimos un modelo de movimiento superlumínico basado en un principio diferente. Actualmente, el modelo está implementado como una de las actividades de la exposición científica interactiva *Lugar a Dudas*, en el Centro Cultural de la Ciencia de la ciudad de Buenos Aires. Veremos a continuación que no solo representa velocidades mayores que c , sino que –como estas velocidades pueden ser infinitamente grandes– también modela viajes en el tiempo, hacia el pasado.

El Estudio de Lugar a Dudas

Lugar a Dudas es un espacio interactivo del Centro Cultural de la Ciencia (www.ccciencia.gob.ar), en Buenos Aires, focalizado en conceptos transversales a diversas áreas del conocimiento científico mediante actividades que se articulan alrededor de las ideas de tiempo, información y azar. *El Estudio* es un módulo con contenido original de Playbots (www.playbots.net) incluido en la muestra permanente *El Tiempo*. Cuenta con una gran pantalla de proyección y una cámara de video que graba al público situado frente a la pantalla. La grabación se proyecta continuamente sobre la misma pantalla, invertida de izquierda a derecha, de modo que el público contempla su propia imagen como en un espejo. Sin embargo, antes de proyectarse, la grabación es procesada de modo de introducir un retraso temporal diferente en cada línea horizontal de la imagen. El retraso es creciente de arriba hacia abajo y totaliza unos 5 segundos entre el extremo superior y el inferior. El panel izquierdo de la figura 1 esquematiza el arreglo de *El Estudio*.

El video depositado en youtu.be/ewwZXRVekKI muestra una grabación de la pantalla de *El Estudio* realizada desde la ubicación del público. Debido al retraso temporal, los movimientos de las dos personas que aparecen en la grabación (los autores de esta nota) se deforman, modulados por amplias ondulaciones que se propagan en dirección vertical.

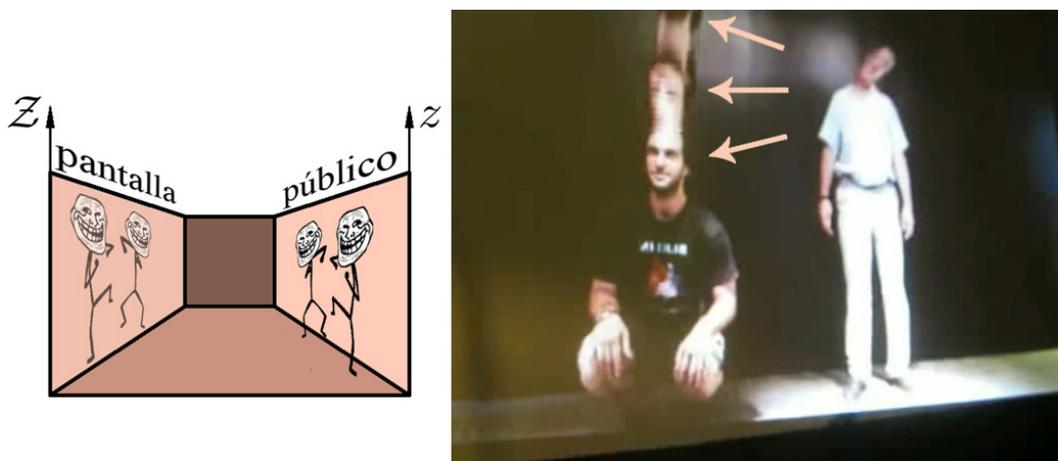


Figura 1: *Izquierda: Esquema de El Estudio. Derecha: Cuadro extraído del video depositado en youtu.be/ewwZXRVekKI, donde se observan simultáneamente tres imágenes de una misma cabeza, señaladas por flechas.*

La segunda sección del video (0:47 en adelante) repite una parte que queremos analizar con más detalle. El video se detiene en un cuadro, reproducido en el panel derecho de la figura 1, en que uno de los autores (S.I.A.) se está levantando luego de haber permanecido agachado por unos segundos. Como vemos, en este cuadro la pantalla muestra simultáneamente *tres* imágenes de la cabeza de S.I.A., indicadas por las flechas. La de más arriba está parcialmente fuera del cuadro, pero se reconoce claramente en los instantes subsiguientes del video. La más interesante de las tres, sin embargo, es la del medio. En primer lugar, está invertida y parcialmente fundida por el cuello con la de arriba y por la frente con la de abajo. Además, según se aprecia en el video, se mueve hacia abajo, viajando entre las otras dos imágenes.

¿Cuál es el origen de las tres imágenes simultáneas del mismo objeto en la pantalla de *El Estudio*? ¿Cómo se explica el comportamiento de la imagen del medio? ¿Es posible que sea mera consecuencia del retraso temporal aplicado a la grabación del objeto en movimiento? A continuación daremos respuesta a estas preguntas, descubriendo una inesperada relación con las velocidades mayores que c y los viajes en el tiempo.

Líneas de mundo e imágenes triples

La descripción matemática de lo que ocurre sobre la pantalla de *El Estudio* puede realizarse en términos muy sencillos. Para simplificar, trataremos solamente movimientos en la dirección vertical. Introducimos una coordenada \mathcal{Z} a lo largo de la vertical de la pantalla y, respectivamente, z en el mundo real, donde se ubica el público. Ambas coordenadas están indicadas en el esquema de la figura 1. La proyección de la imagen del mundo real sobre la pantalla está dada por cierta función $\mathcal{Z}(z)$, que depende de cómo se hayan definido ambas coordenadas. Sin pérdida de generalidad, esta función puede ser la identidad, $\mathcal{Z} = z$.

Consideremos ahora un objeto puntual que, en el mundo real, realiza un movimiento de ecuación $z(t)$. Por razones que quedarán claras inmediatamente, nos conviene invertir la relación entre espacio y tiempo, obteniendo la función $t(z)$. Supongamos además que el retraso temporal τ aplicado a la grabación del objeto varía con la altura en la pantalla según una función $\tau(\mathcal{Z})$. El tiempo t' al cual la imagen sobre la pantalla alcanza la altura $\mathcal{Z} = z$ a la que se encontraba el objeto en el mundo real a tiempo t está dado por

$$t' = t(\mathcal{Z}) + \tau(\mathcal{Z}). \quad (1)$$

Despejando \mathcal{Z} como función de t' , tendremos la ecuación de movimiento de la imagen del objeto sobre la pantalla. Es importante comprender que ambos tiempos, t y t' , están medidos por el mismo observador –por ejemplo, un miembro del público que examina cómo se mueven el objeto y su imagen. La ecuación 1 expresa simplemente que, para cada altura sobre la pantalla, la diferencia entre ambos tiempos está dada por el retraso τ .

La operación definida por la ecuación 1 tiene una representación geométrica directa en términos del gráfico de la función $z(t)$. En la Teoría de la Relatividad, el gráfico de la trayectoria de un objeto puntual en el espacio-tiempo se llama *línea de mundo* del objeto. Las curvas más claras en los dos paneles de la figura 2 muestran la línea de mundo de un objeto en el mundo real, con movimiento ascendente similar al de la cabeza del video. La flecha a lo largo de la curva muestra el sentido del movimiento –naturalmente, en la dirección creciente del tiempo.

La ecuación 1 indica que, para obtener la línea de mundo de la imagen del objeto sobre la pantalla, debe sumarse a la coordenada temporal de la trayectoria en el mundo real un retraso que, para cada altura, tiene el valor prescripto por la función $\tau(\mathcal{Z})$. Esta operación está representada en la figura por las flechas horizontales, correspondiendo a un retraso que crece de arriba hacia abajo, como en la pantalla de *El Estudio*.

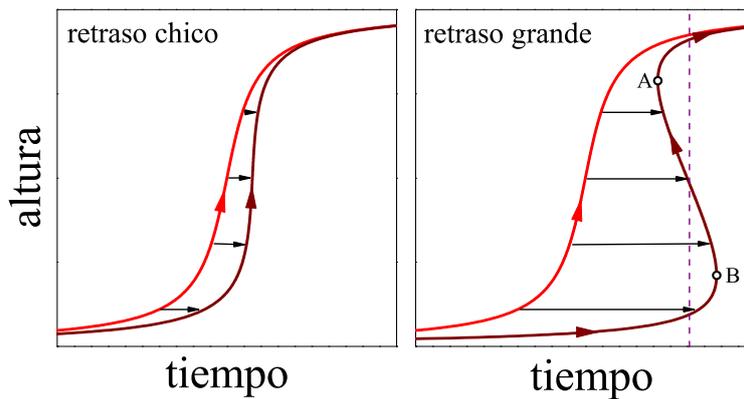


Figura 2: *Líneas de mundo de un objeto con movimiento ascendente, en el mundo real (curvas claras) y sobre la pantalla de El Estudio (curvas oscuras). Las flechas horizontales representan la adición del retraso temporal, que crece de arriba hacia abajo. El retraso es más pequeño en el gráfico de la izquierda que en el de la derecha. En este último, la recta vertical punteada indica un tiempo al que se ven tres imágenes del objeto sobre la pantalla. Los puntos A y B limitan el intervalo en que aparecen las tres imágenes.*

Como vemos en el panel de la izquierda, un retraso temporal chico deforma levemente la línea de mundo, pero no modifica su aspecto general. En cambio, un retraso más grande, como en el panel de la derecha, puede tener consecuencias más drásticas.

El “pliegue” que se forma en la zona central de la línea de mundo al sumar el retraso temporal explica inmediatamente el efecto de las tres cabezas del video. La recta vertical punteada indica uno de los tiempos en los que la imagen del objeto aparece tres veces sobre la pantalla. A este tiempo contribuyen tres momentos diferentes de la trayectoria en el mundo real. Analizando el gráfico a lo largo de la coordenada temporal, queda claro también cómo se generan y se desplazan las tres imágenes. Inicialmente, sólo se observa la imagen de más abajo, subiendo lentamente. En cierto instante, aparece abruptamente una imagen en la zona superior de la pantalla (punto A), que inmediatamente se separa en dos. A partir de este momento tenemos tres imágenes. De las dos recién aparecidas, la superior sube y la del medio baja acercándose a la inferior, que sigue subiendo. Finalmente, estas dos colapsan en una sola y desaparecen (punto B), y solo sobrevive la de más arriba. Una observación cuidadosa del video muestra que esta es efectivamente la “historia” de las tres cabezas.

Velocidades infinitas y viajes al pasado

Las condiciones para que aparezca un “pliegue” al sumar el retraso temporal pueden obtenerse a partir de la ecuación 1, teniendo presente que la pendiente de la línea de mundo no es otra cosa que la velocidad. Para simplificar la discusión, supondremos que el retraso temporal sobre la pantalla varía linealmente de arriba hacia abajo, de modo que podemos escribirlo como $\tau(\mathcal{Z}) = (\mathcal{Z}_0 - \mathcal{Z})/u$, donde \mathcal{Z}_0 indica el punto más alto de la pantalla y u es una constante con unidades de velocidad. Si llamamos v a la velocidad del objeto en el mundo real y v' a la velocidad de su imagen sobre la pantalla, la ecuación 1 implica

$$\frac{1}{v'} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}. \quad (2)$$

Aquí vemos que en los puntos donde $v = u$ la velocidad v' es infinita, con lo que la línea de mundo sobre la pantalla se hace vertical (puntos A y B) y se genera el “pliegue”.

Luego de nuestra discusión introductoria, sin embargo, la mención de una velocidad infinita no debería dejar de despertar suspicacias. ¿Qué es lo que se mueve con velocidad infinita cuando la línea de mundo se hace vertical? En nuestro caso, se trata de la imagen del objeto sobre la pantalla. Alrededor de los puntos A y B, en los dos sectores donde la pendiente es mayor que c , la imagen se mueve de hecho más rápido que la luz. Naturalmente, como este movimiento no implica que se esté desplazando ningún objeto material, no hay contradicciones con la Relatividad. La imagen sobre la pantalla entra dentro de la categoría de “cosas” que pueden moverse con velocidad mayor que la de la luz, tal como mencionamos en la introducción. Por lo tanto, también puede ser considerada como un modelo de movimiento superlumínico.

Pero las peculiaridades cinéticas de la imagen sobre la pantalla no terminan aquí. En el tramo de la línea de mundo que une los puntos A y B, la sucesión de eventos a lo largo de la “historia” de la imagen –indicada por la flecha sobre la curva– transcurre en sentido contrario al eje del tiempo. Si se tratara de una línea de mundo de un objeto real, deberíamos concluir que el objeto se está moviendo ¡hacia atrás en el tiempo!²

En este punto, vale la pena explicar que para hablar de viajes en el tiempo necesitamos que el objeto que viaja lleve consigo un reloj propio que pueda

²Esta interpretación de los tramos “invertidos” de las líneas de mundo ya está implícita en la teoría del *Uníverson de un electrón* de J. Wheeler. En su artículo “*Theory of positrons*” (1949), R. Feynman propone considerar a los positrones como electrones viajando hacia el pasado. La misma noción reaparece en los diagramas de Feynman para la aniquilación partícula-antipartícula si se los interpreta como gráficos en el espacio-tiempo.

compararse con el reloj del observador que lo mira viajar. Si, por ejemplo, el objeto es un ser vivo, el candidato ideal como reloj propio es cualquiera de sus procesos biológicos –como su propio envejecimiento. Durante un viaje al pasado, el reloj propio seguiría avanzando normalmente, pero respecto del tiempo del observador estaría andando “marcha atrás”. En otras palabras, el observador vería al viajero rejuveneciendo progresivamente.

Esto es exactamente lo que ocurre en el tramo central de la línea de mundo sobre la pantalla de *El Estudio*, sólo que en este caso el viajero no es un ser vivo, sino una imagen. En analogía con el movimiento superlumínico, entonces, la imagen nos proporciona un modelo para un viaje en el tiempo, hacia el pasado. Volviendo al video de las tres cabezas, si fuéramos capaces de percibir el envejecimiento de S.I.A. durante el breve lapso donde se ve la imagen triple, veríamos que la cabeza del medio rejuvenece.

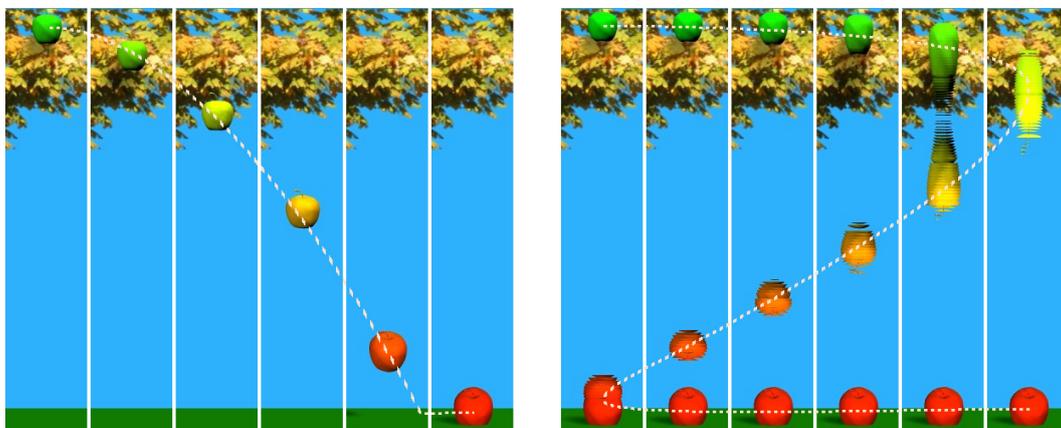


Figura 3: *Izquierda: Sucesión de imágenes de la primera sección del video depositado en youtu.be/-R07nMhK0zk, con una manzana que cambia de color, de verde a rojo, mientras cae. Derecha: Sucesión de imágenes de la animación con retraso temporal (segunda sección del video), donde se ven simultáneamente tres imágenes de la manzana. Las líneas de puntos siguen las trayectorias de cada imagen.*

Por supuesto, el envejecimiento o rejuvenecimiento de la cabeza en el video escapa por completo a nuestra percepción. Pero nada nos impide simular el mismo proceso computacionalmente para poder estudiarlo a voluntad. La primera sección de la animación depositada en youtu.be/-R07nMhK0zk muestra la caída de una manzana. A medida que cae, la manzana “madura”, cambiando de color verde a rojo. El color funciona entonces como su reloj interno. El panel de la izquierda en la figura 3 muestra una sucesión de imágenes de la animación.

En la segunda sección (que luego se repite más lentamente), aplicamos un

retraso temporal a cada línea de la animación. A diferencia de la cabeza en *El Estudio*, la manzana se mueve hacia abajo, de modo que el retraso debe crecer hacia arriba para conseguir el efecto de triple imagen. En nuestro caso, elegimos un retraso que aumenta linealmente con la altura, alcanzando 5 segundos para la línea más alta. La imagen del medio se comporta como esperábamos, y tal como ilustra el panel derecho de la figura 3. Aparece y desaparece en bifurcaciones con las otras dos imágenes, se mueve hacia arriba –en dirección contraria a la manzana original– y, a medida que pasa el tiempo, reverdece en vez de madurar. Si fuera una manzana real, la estaríamos viendo viajar hacia su propio pasado. Y si fuéramos capaces de medir su velocidad muy cerca del colapso con las otras manzanas, podríamos obtener valores arbitrariamente mayores que c .

Cuestiones y extensiones

Hasta aquí describimos el efecto de la triple imagen en la pantalla de *El Estudio*, y mostramos que puede explicarse como consecuencia directa de retrasos temporales aplicados a la grabación de determinados movimientos. Vimos que la imagen de un objeto del mundo real sobre la pantalla puede servir como modelo de movimiento superlumínico y de viajes en el tiempo, hacia el pasado.

Inmediatamente, surgen preguntas sobre la versatilidad de este efecto. ¿Cuán arbitraria es la forma de la línea de mundo deformada por el retraso temporal? ¿Sería posible, por ejemplo, crear un ciclo cerrado sobre la pantalla a partir de una trayectoria abierta en el mundo real? ¿En qué medida se generalizaría el efecto si el retraso temporal se hiciera punto a punto, en vez de línea a línea, sobre la imagen grabada? ¿Qué condiciones debería satisfacer el retardo temporal para que en el mundo modelado sobre la pantalla se respeten los principios de la causalidad, ya sea en sentido clásico o relativista? ¿Cómo fluye la información sobre la pantalla para una dada distribución de retrasos? Preguntas como para entretenerse un rato pensando, y quizás garabatear alguna cuentita.