

Superluminidad: ¿es posible viajar más rápido que la luz?



Está demostrado que bajo ciertas condiciones se pueden transmitir pulsos luminosos con velocidades mayores a la de la luz. Por ello, se ha iniciado la búsqueda de mecanismos para la transmisión superluminal de información.

Luis Mochán y Vera L. Brundy

INTRODUCCIÓN

La velocidad de la luz (aproximadamente 300 mil kilómetros por segundo) es una cantidad enorme. En las escalas de los sentidos humanos, es imposible distinguir una propagación a la velocidad de la luz de una propagación instantánea. Fue Descartes quien propuso, en el siglo XVII, observar los cielos para resolver la controversia ancestral sobre la naturaleza finita o infinita de la propagación luminosa. Si la velocidad de la luz fuera finita, la sombra proyectada por la Tierra tardaría cierto tiempo en llegar a la órbita de la Luna (Huygens, 1994). Por lo tanto, la posición de la Luna al iniciarse un eclipse lunar no sería opuesta a la posición del Sol (figura 1). Como las mejores observaciones de la época mostraban que los eclipses lunares sucedían precisamente cuando la Luna se opo-

nía al Sol, Descartes concluyó que la propagación de la luz era instantánea.

Poco tiempo después, Römer observó que los eclipses de los satélites de Júpiter se iniciaban hasta con diez minutos de adelanto o de retraso con respecto a su tiempo nominal. El retraso máximo sucede cuando la Tierra se halla en el punto de su órbita más lejano a Júpiter, y el adelanto máximo cuando la Tierra se halla en el punto más cercano (figura 2). Römer concluyó que dichas fluctuaciones no eran debidas a irregularidades en el movimiento mismo de los satélites jovianos, sino que se debían al tiempo que tarda la luz en recorrer el diámetro de la órbita terrestre. Bajo esta hipótesis, calculó la velocidad de la luz, obteniendo un valor sorprendentemente cercano al aceptado en la actualidad. La velocidad de la luz se ha logrado medir con tal precisión que el sistema internacional de unidades ha abandonado el estándar de distancia basado en una barra patrón y ha adoptado por definición el valor de 299 millones 792 mil 458 metros por segundo para la velocidad de la luz como su unidad de velocidad, denotada por la letra *c*. Esto convirtió al metro en una cantidad no fundamental, derivada del tiempo y de la velocidad.

En la segunda mitad del siglo XIX, James Clerk Maxwell logró sintetizar todos los fenómenos de la electricidad y del magnetismo en un conjunto de ecuaciones, una de cuyas consecuencias es la predicción, verificada 20 años más tarde por Hertz, de que el campo electromagnético se podría propagar en el vacío como una onda, con cierta velocidad que depende de constantes electromagnéticas del espacio vacío. Sorprendentemente, dicha velocidad resultó ser igual al valor conocido para la velocidad de la luz, c . La conclusión inevitable fue que la luz era sólo una manifestación más del electromagnetismo.

Durante el desarrollo de la teoría electromagnética, Maxwell empleó un modelo mecánico de cierta complejidad para representar el éter, ese asiento de los fenómenos electromagnéticos que, según se creía, llenaba todo el espacio. La búsqueda de dicho éter electromagnético hacia finales del siglo XIX y principios del XX arrojó resultados negativos. Quizás el más conocido de los experimentos llevados a cabo en dicha búsqueda sea el de Michelson y Morley, quienes intentaron medir la velocidad con que la Tierra se desplazaba con respecto al éter, obteniendo un resultado nulo. La gran confusión alrededor de la interpretación de éste y otros resultados, como la observación de la aberración estelar, concluyó cuando Albert Einstein propuso la teoría de la relatividad especial.

En uno de sus artículos clásicos de 1905, Einstein analizó un experimento sencillo de inducción electromagnética (figura 3). Al acercar un imán a un circuito rígido inmóvil, se produce una fuerza electromotriz debida al campo eléctrico que se induce al variar el flujo magnético. Por otro lado, si el imán estuviera fijo y fuera el circuito el que se acerca, se produciría de nuevo una fuerza electromotriz, pero esta vez debido a la fuerza magnética sobre las cargas del circuito móvil. Aunque en ambos casos hay una fuerza electromotriz, su origen físico es distinto: inducción electromagnética y fuerza magnética. El genio de Einstein consistió en preguntarse el porqué de fenómenos simples que los demás consideraban obvios; en este caso se preguntó por qué dos fenómenos tan distintos llevaban al mismo valor de la fuerza electromotriz. Concluyó que esto no podía ser una coincidencia, sino consecuencia de un principio fundamental. De haber obtenido fuerzas electromotrices distintas,

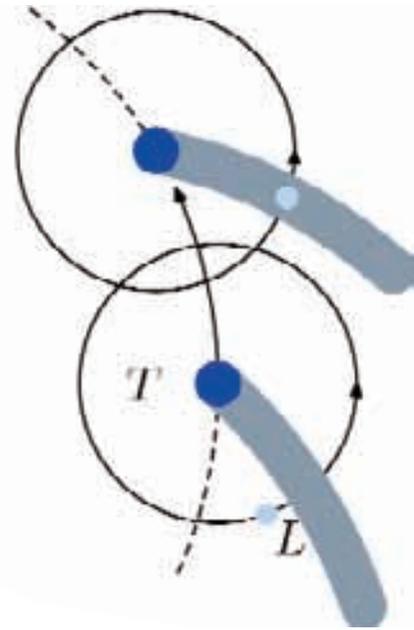


Figura 1. Eclipse de Luna en un universo donde la luz se propaga lentamente. Se muestra el Sol (S), la Tierra (T) y la Luna (L) durante un eclipse lunar, y momentos antes de que la Luna penetre en la sombra de la Tierra. Esta última forma una espiral y no está a lo largo de una recta en línea con el Sol debido a la translación de la Tierra y a la velocidad finita de la luz. Se indican la órbita de la Tierra y la de la Luna.

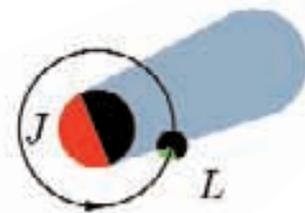
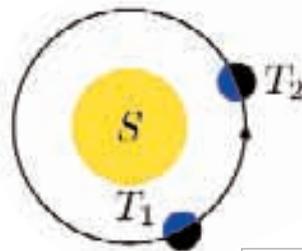


Figura 2. Inicio de un eclipse en que una luna (L) de Júpiter (J) penetra en su sombra. Los eclipses se repiten periódicamente, pero se observan adelantados o retrasados a lo largo del año desde posiciones distintas de la Tierra sobre su órbita (como T1 y T2), debido a la diferencia en los tiempos que requiere la luz para recorrer distancias tales y como L-T1 y L-T2.

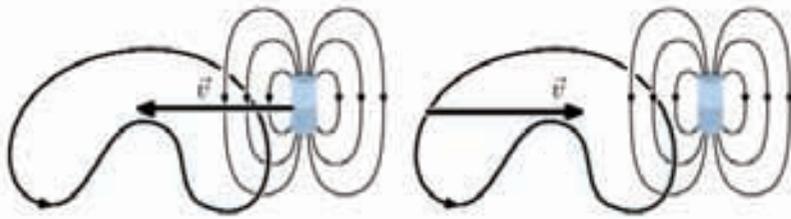


Figura 3. a) Un imán que se acerca a un circuito eléctrico (línea gruesa). **b)** Un circuito que se acerca a un imán. En ambos casos, la fuerza electromotriz inducida en el circuito toma el mismo valor, dependiendo únicamente de la velocidad relativa (v). Sin embargo, cuando el imán es el que se mueve, sobre las cargas de conducción del circuito sólo actúan fuerzas eléctricas inducidas por la variación temporal del campo magnético. Por otro lado, cuando el imán permanece fijo, su campo magnético no induce un campo eléctrico y sobre las cargas del circuito sólo actúan fuerzas magnéticas.

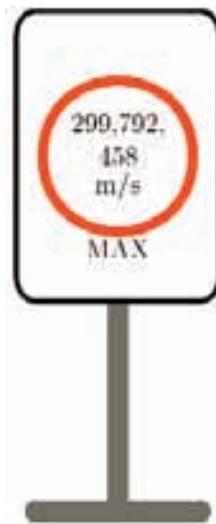
En la mecánica clásica,
la distancia
entre dos eventos
depende
del observador
que la mide

Art. III. MCDXVI Por órdenes de la autoridad, sin excepción alguna, queda estrictamente *prohibido* viajar con velocidad $v >$

Figura 4. La velocidad de la luz (c) es un invariante, y es la velocidad máxima a la que nos podemos mover.

podríamos responder la pregunta: ¿quién se mueve, el circuito o el imán? Pero la electrodinámica no nos permite contestar dichas preguntas. Einstein concluyó que ningún experimento puede contestar preguntas como éstas; el estado de movimiento respecto al éter no es observable; el éter no es detectable y es preferible no postular su existencia, la cual es innecesaria. El único movimiento que tiene sentido es el movimiento *relativo*, y todas las leyes de la física, no sólo las de la electrodinámica, deben coincidir en todos los sistemas de referencia, aunque se muevan uno respecto a otro.

La velocidad de la luz se deriva de las propiedades electromagnéticas del vacío, y la velocidad de un observador respecto al vacío es un concepto sin sentido, no observable. Por lo tanto, la velocidad de la luz debe ser absoluta, la misma para todo observador inercial (figura 4): c es una cantidad invariante. Como corolario, la velocidad no puede ser una cantidad aditiva: si un rayo luminoso se mueve con la velocidad c con respecto a cierto observador, y dicho observador se moviera respecto a nosotros con una velocidad de $0.9c$, dicho rayo luminoso *no* se movería con respecto a nosotros a velocidad $1.9c$; de alguna manera, ¡ $0.9c + c = c!$ Sumar velocidades de esta curiosa manera requiere modificar nuestros conceptos de espacio y tiempo, y reformular tanto la cinemática como la dinámica.



En la mecánica clásica, la distancia entre dos eventos depende del observador que la mide. Si nos subimos a un autobús por la puerta delantera y nos bajamos seis horas después por la puerta trasera, la distancia recorrida sería de sólo unos cuantos metros respecto al chofer, mientras que el amigo que nos reciba en la estación diría que hemos recorrido varios centenares de kilómetros. Ambos estarían en lo cierto, a pesar del aparente desacuerdo. En la mecánica relativista, el tiempo transcurrido entre dos eventos no es invariante y también depende del observador que lo mida. Así, en una carrera interespacial de velocidad, los relojes de los pilotos se retrasarían con respecto al del juez que los espera en la meta. Aunque ellos aceleraran a fondo, el juez

observaría que el tiempo que tardan en lograr un incremento dado en su velocidad se alarga conforme su velocidad aumenta, de manera que, por más que aceleren, ¡nunca podrían alcanzar la velocidad de la luz!

Ningún objeto puede alcanzar, y menos aún sobrepasar, la velocidad de la luz. A muchos puede parecerles que esta limitación no es motivo de preocupación. La velocidad de la luz es aproximadamente un millón de veces mayor que cualquier velocidad alcanzada por vehículos humanos. Sin embargo, la estrella más cercana, *Alpha Centauri*, se halla a una distancia de 4.3 años luz de nosotros. Si no lográramos viajar a velocidades superluminales, es decir, mayores que la velocidad de la luz, nuestros sueños de exploración del Universo no podrían realizarse en el curso de una vida humana, como bien saben los autores de ciencia ficción. En otra escala de distancias y tiempos, consideremos la propagación de señales en una computadora. En un ciclo de una computadora contemporánea, con un reloj de, digamos, 1 gigahertz (mil millones de ciclos por segundo), la luz recorre apenas unos 30 centímetros. Toda la memoria de dicha computadora debe hallarse a una distancia menor a 15 centímetros de la unidad de proceso central para evitar que sus cálculos se tengan que interrumpir en espera de datos. Por lo tanto, una computadora más rápida y con mayor capacidad de memoria requiere de una mayor miniaturización. Como las componentes electrónicas difícilmente podrán hacerse más pequeñas que unas cuantas veces el tamaño de un átomo, la existencia de una velocidad máxima de propagación impone límites físicos fundamentales sobre la capacidad que puedan desarrollar las computadoras del futuro. ¿Podremos viajar más lejos o desarrollar computadoras más rápidas? ¿Existirá algo más rápido que la luz?

RELATIVIDAD ESPECIAL Y CAUSALIDAD

Hemos visto que la disposición espacial de dos eventos separados en el tiempo es relativa y depende del observador. Nos bajamos del autobús unos metros *hacia atrás* de donde nos subimos, según nuestro chofer, pero cientos de kilómetros *hacia delante*, según nuestro amigo en la estación. Atrás o adelante, arriba o abajo y derecha o izquierda son conceptos relativos al observador cuando se aplican a eventos separados en el tiempo. De la misma manera, en la teoría de la relatividad ¡antes y después pueden ser conceptos relativos cuando se aplican a eventos separados en el espacio! El espacio-tiempo puede dividirse en varias regiones a partir de un evento dado, que denomina-



La estrella más cercana,
Alpha Centauri,
se halla a una distancia
de 4.3 años luz
de nosotros

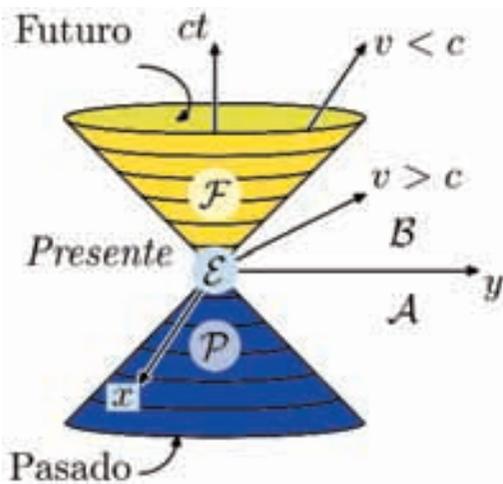


Figura 5. El espacio-tiempo y sus distintas regiones, de acuerdo a señales que pasan por cierto evento E . Se representa el espacio por el plano horizontal x - y , y al tiempo en el eje vertical. El conjunto de círculos horizontales representa distintas etapas de un frente de onda esférico que converge sobre el origen y posteriormente se expande con la velocidad de la luz, c . La unión de todos los círculos produce el *cono de luz*. Se muestran una señal subluminal (cuya velocidad es menor que la de la luz, $v < c$) dentro del cono de luz y otra superluminal (con velocidad mayor que la de la luz, $v > c$) fuera del cono de luz, y se muestran eventos P en el pasado de E , F en su futuro, A anterior y B posterior.

remos E (figura 5). Su *futuro* es el conjunto de todos los eventos (tales como F en la figura 5) que se pueden alcanzar desde E viajando a velocidades menores que la de la luz. Similarmente, su *pasado* está formado por los eventos (como P) desde los cuales se puede alcanzar a E viajando a velocidades subluminales. Un pulso de luz producido en E se aleja formando un frente de onda esférico que crece con el tiempo, ilustrado en la figura 5 por un conjunto de círculos. La unión de todos éstos forma el llamado *cono de luz futuro* del evento E . Análogamente, una onda que converge sobre E forma el cono de luz pasado. Finalmente, los demás eventos como A y B no pueden conectarse con E mediante señales, a menos que éstas sean superluminales. Al conjunto de estos últimos se le llama el *presente* de E . Debido a la invariancia de la velocidad de la luz, la estructura del espacio-tiempo descrita arriba es la misma para todos los observadores: todos asignarían el mismo pasado, futuro y cono de luz al evento E . Cualquier observador estaría de acuerdo en que F es posterior a E , y P es anterior. Sin embargo, los eventos en el *presente* pueden ser posteriores, anteriores o simultáneos de acuerdo a quién los observe. Así, la figura 5 nos muestra que A es anterior y B posterior a E . Pero un viajero V que se mueva con suficiente velocidad hacia la derecha o la izquierda podría observar que B antecede a E o que E antecede a A , respectivamente.

Si pudiéramos emitir una señal superluminal en el evento E y fuera recibida por nuestro amigo viajero V en B , podría devolvernosla, y la señal podría llegarnos en P , *antes* de E . Esto nos permitiría comunicarnos con nuestro propio pasado, lo cual podría conducir a situaciones divertidas. Podríamos enviar en E un mensaje que recibimos en P , nuestro amigo lo recibiría en B , nos lo devolvería inmediatamente para que lo recibiéramos en P y lo enviáramos en E y... El mensaje estaría así atrapado en un bucle de espacio-tiempo sin haber sido escrito jamás. Imagine el lector que en E un joven le reclama a su novia su silencio. Ella contesta en B y como el joven recibe la respuesta en P , no reclama en E ; ella no recibe mensaje alguno en B y no elabora la respuesta, por lo cual el joven no recibe mensaje en P y envía un reclamo en E ... Las situaciones absurdas descritas en el párrafo anterior pueden resolverse si postulamos que *nada puede moverse más rápido que la luz* (figura 4).

CONTRAEJEMPLOS

Desafortunadamente, el postulado con el que concluimos la sección anterior es incorrecto. Consideremos la luz proyectada

por el faro de la figura 6. Si la linterna da una vuelta en un tiempo T , la mancha luminosa que proyecta sobre una pantalla cilíndrica situada a una distancia R y de perímetro $2\pi R$ se desplazaría con una velocidad $2\pi R/T$. Basta con tomar una distancia R suficientemente grande para que esta velocidad sobrepase a la velocidad de la luz. Otros ejemplos son las olas al romper, las cuales, dependiendo de su ángulo de propagación, podrían recorrer la orilla a velocidades arbitrariamente altas, y las hojas de una tijera, que mientras más cerradas más rápidamente rasgan el papel (figura 7).

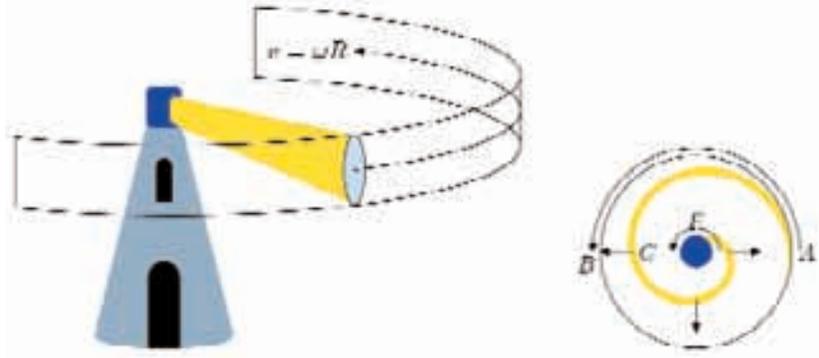


Figura 6. Un faro (izquierda) cuya linterna gira con velocidad angular $\omega = 2\pi/T$. Se muestra la mancha luminosa proyectada en una pantalla a una distancia R . La vista desde arriba (derecha) muestra que la energía luminosa se distribuye en una región espiral (amarilla) que se expande sin girar con la velocidad de la luz, c (flechas rectas), produciendo una mancha luminosa que se mueve superluminalmente (flecha semicircular) sobre la pantalla desde A hasta B en un tiempo $T/2$, aunque en dicho tiempo la luz sólo se propague desde C hasta B .

Hemos mostrado varias formas simples de traspasar la barrera lumínica. Sin embargo, nuestros ejemplos adolecen de una fuerte limitación: la propagación superlumínica que ilustran no transmite información. Consideremos la vista superior del faro en la figura 6. Mientras que la mancha luminosa se propaga sobre la pantalla desde A hasta B superluminalmente, la energía luminosa solamente se propaga desde C hasta B a la velocidad de la luz. En el instante ilustrado en la figura, no hay nada que podamos hacer en la posición A que nos permita modificar la posterior llegada de la mancha luminosa al punto B . No hay una relación causa-efecto entre la llegada de la luz a A y su subsiguiente llegada a B . La luz llega a A proveniente del faro F , y la luz que llega un tiempo después a B ¡proviene de F vía C , pero no de A ! De manera que debemos modificar nuestro postulado: sí es posible el movimiento superluminal, *siempre y cuando no transmita información*.

ejecutar aquellas que pudieran conducir a situaciones paradójicas? Más aún, ¿no será que el libre albedrío es sólo una ilusión humana? Tal vez en un universo totalmente determinista no haya paradojas derivadas de los viajes en el tiempo, y podríamos comunicarnos con nuestro pasado pero no modificarlo. Hagamos a un lado las discusiones de corte metafísico y

ONDAS

Hemos visto que la teoría de la relatividad implica que las partículas no pueden ser aceleradas hasta velocidades superluminales. También implica que la propagación superluminal de una señal nos permitiría comunicarnos con nuestro pasado, lo cual conduciría a paradojas si pudiéramos modificar nuestro comportamiento de acuerdo a la información recibida del futuro. Luego, la transmisión superluminal de información debe ser imposible. Pero, ¿no será que lo imposible sea nuestra capacidad de tomar decisiones de manera arbitraria? ¿O al menos, de

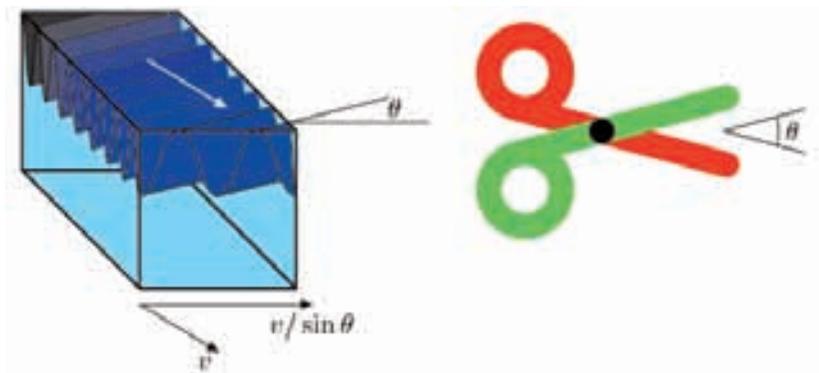


Figura 7. Izquierda: una piscina llena de agua en cuya superficie se propagan olas con una velocidad \vec{v} que forma un ángulo θ con respecto a una de las orillas. Derecha: unas tijeras cuyas hojas se intersectan con un ángulo θ .



volvamos a la búsqueda de *algo* que pueda propagarse superluminalmente.

Dado que la dinámica relativista impide la propagación superluminal de partículas, concentremos nuestra atención en la propagación de ondas luminosas. La luz se propaga debido a que, cuando un campo eléctrico oscila, genera un campo magnético y, a su vez, un campo magnético que oscila induce un campo eléctrico. Además, en la materia, los campos eléctricos ponen en movimiento a sus partículas cargadas, y las cargas en movimiento radian campos electromagnéticos que se suman al producido por otras cargas y al campo incidente, modificando su velocidad de propagación: mientras más se desplaza cada carga en respuesta al campo electromagnético, más lenta es la propagación de la luz. La velocidad con la que se propaga la luz dentro de un material depende de su color, como mostró Newton con su famoso prisma. Normalmente, la luz azul viaja más lentamente que la luz roja dentro de un material transparente, y ambas viajan más lentamente que en el vacío.

Así como un columpio tiene una frecuencia natural de oscilación con la cual lo debemos impulsar si queremos mecer a un niño, los electrones en un material tienen sus propias frecuencias de resonancia, y su respuesta al campo electromagnético es más intensa cuanto más cerca a la resonancia se halle la frecuencia de la onda. Estas resonancias son las responsables de los diversos colores de los materiales. Cuando el campo electromagnético oscila con una frecuencia justo mayor a la de alguna resonancia, los electrones se retrasan y oscilan con una amplitud grande pero *en dirección opuesta* al campo que los impulsa. En esta situación, el campo electromagnético no se puede propagar y el material se vuelve opaco. Para frecuencias aún mayores, la amplitud del movimiento electrónico se reduce, por lo cual el material vuelve a ser transparente, pero la oscilación electrónica sigue siendo opuesta al campo. En estas condiciones, ¡las ondas electromagnéticas se pueden propagar a velocidades superluminales!

Aunque el resultado anterior es bien conocido, no ha sido motivo de preocupación. El campo asociado a las ondas monocromáticas (con frecuencia y color bien determinados) se repite periódicamente *sin cambio alguno* en su amplitud, sin terminar jamás y sin haberse iniciado nunca. Dicha oscilación representa un proceso *estacionario* que, como no cambia, no transmite información. Para transmitir información empleando ondas, debemos modular éstas de alguna manera, ya sea en su amplitud, fase, frecuencia, polarización o cualquier combinación de estos atributos. Por lo tanto, lo importante no es la ve-

locidad con la que se propaga la *fase* de la onda, sino la velocidad con la que se propaga su *modulación*.

Como muestra la figura 8, una onda modulada puede construirse sumando varias ondas monocromáticas, es decir, formando un *grupo* de ondas, cada una de las cuales se mueve independientemente de las demás. Así, un *pulso* de duración finita se forma sumando muchas ondas extendidas que interfieren entre sí destructivamente (se cancelan) en todo el espacio, excepto en un región pequeña. La velocidad del pulso es la velocidad a la que se mueve esta pequeña región donde la interferencia es constructiva. Las múltiples crestas y valles mostrados por la figura 8 se propagan con una velocidad que en general es diferente a la velocidad del grupo. En sistemas transparentes, la velocidad de grupo es subluminal, tanto para frecuencias por debajo como por arriba de las frecuencias de resonancia, por lo que, en ellos la información no puede propagarse más rápido que la luz en el vacío.

Para frecuencias que caen en regiones de opacidad, la amplitud de la onda decae conforme ésta avanza en el material. Pero, ¿con qué velocidad avanza? Resulta que en la región de opacidad la velocidad de grupo sí puede ser superluminal. ¿Debe ser esto motivo de preocupación? El concepto de velocidad de grupo es aplicable de manera estricta a pulsos que se desplazan rígidamente sin deformarse. En materiales opacos, cada componente monocromática del pulso tiene su propia distancia de amortiguamiento, por lo cual el pulso se deforma conforme avanza y el concepto mismo de velocidad de grupo pierde su sentido.

EXPERIMENTOS

Se han propuesto definiciones alternativas a la velocidad de grupo para caracterizar los pulsos en medios opacos que se deforman mientras se propagan. Por ejemplo, la velocidad del primer frente de ondas, que, según se ha demostrado, sí es subluminal. Sin embargo, la mecánica cuántica arroja dudas sobre el concepto mismo de *primer* frente de onda, y no ha sido posible construir un consenso entre los físicos teóricos sobre la fac-

tibilidad de observar la propagación superluminal de pulsos. Veamos entonces qué dicen los experimentos.

En un experimento típico, un pulso luminoso se divide en dos mediante un cristal no lineal. El primero pasa por una muestra, mientras que el segundo atraviesa una región vacía del mismo ancho. Finalmente, los dos pulsos

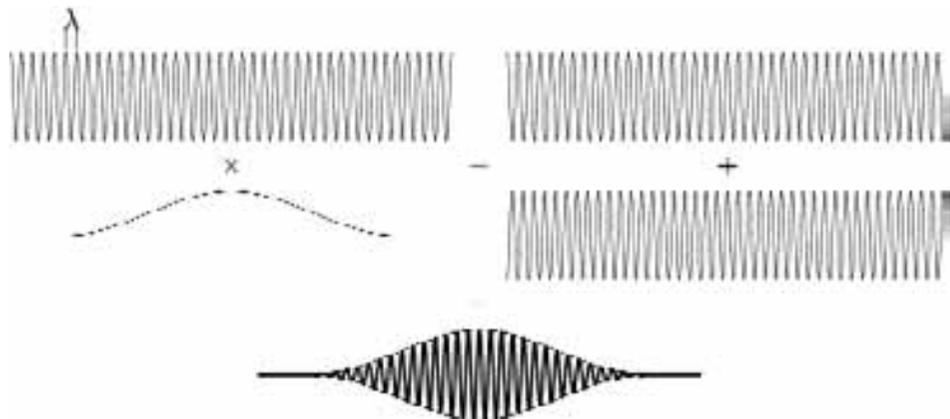


Figura 8. Grupo de ondas (centro) formado por el *producto* de una onda monocromática pura y una envolvente que la modula (izquierda), o, equivalentemente, por la *suma* de varias ondas puras de frecuencias cercanas (derecha). Las ondas monocromáticas que conforman al grupo interfieren entre sí de forma destructiva en los extremos y de manera constructiva en el centro del grupo.

Una onda modulada
puede construirse
sumando varias ondas
monocromáticas

se recombinan en uno solo cuando llegan simultáneamente a un segundo cristal no lineal. Para sincronizarlos, se puede retrasar al segundo pulso, forzándolo a recorrer un camino más largo mediante un sistema de espejos; la diferencia en las longitudes de las trayectorias compensadas permite obtener el retraso de la luz por atravesar la muestra. Cada milímetro equivale a tres millonésimas de millonésima de segundo. Para diversas muestras, como medios opacos y cristales fotónicos, se ha hallado que es necesario *acortar* en vez de alargar el camino del segundo pulso, indicando que ¡dichas muestras son recorridas a velocidades superiores a la de la luz en el vacío!

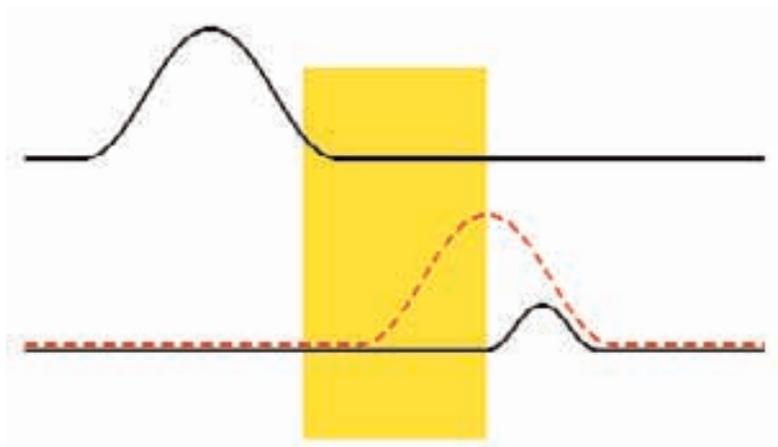


Figura 9. Un pulso (arriba) antes de entrar a un medio opaco (rectángulo amarillo) y después de emerger de él (abajo). Se compara con el pulso que hubiera emergido (línea roja) de haber estado ausente el medio.

Para entender si en estos experimentos se viola o no la causalidad impuesta por la teoría de la relatividad, en la figura 9 ilustramos algunos aspectos de los pulsos que atraviesan superluminalmente medios opacos (Romero-Rochín y colaboradores, 2001). Resulta que la duración del pulso que emerge es menor que la del pulso incidente, y como el medio es opaco, su altura es también menor. Una comparación cuidadosa del pulso superluminal con el pulso nominal, tal y como se vería si se hubiera transmitido a través del vacío en lugar de a través del medio opaco (figura 9), muestra que el pulso superluminal ¡se halla completamente contenido dentro de la envolvente del pulso nominal!

Las observaciones anteriores sugieren una explicación muy sencilla de la superluminidad, para la cual recurriremos a una analogía. Imaginemos un grupo de ciudadanos en una marcha de protesta (figura 10). Cuando un policía ve pasar a los primeros manifestantes, los confunde con simples paseantes, pero poco a poco cae en la cuenta de que no es normal que haya tantos paseantes tan cerca unos de otros caminando en la misma dirección. Cuando reconoce que se halla frente a una marcha de protesta y empieza a reprimirlos, los primeros manifestantes ya lo han dejado atrás. Si queremos describir este sistema en términos de pulsos, diríamos que el pulso incidente se propagó sin modificación hasta que el policía reconoció la marcha, atrapó a algunos manifestantes (absorción) y ahuyentó a los demás (reflexión). La parte inicial del pulso transmitido es entonces similar a la del pulso incidente, aunque su parte trasera se halla diezmada por la absorción y la reflexión. Además, la duración del pulso transmitido es necesariamente más corta que la del pulso incidente. Finalmente, el centroide del pulso trans-

mitido se halla adelantado una distancia x , relativamente grande con respecto al centroide del pulso incidente, pero no porque los primeros manifestantes caminaran más rápido, sino simplemente porque *la retaguardia del contingente nunca llegó*. La velocidad de propagación del centroide $v = x/\delta$ bien podría llegar a ser superluminal, pero no representa la velocidad con la que se propaga ningún fenómeno físico, ni los manifestantes, ni la información ni la energía. Análogamente, la parte inicial de una onda puede pasar por un medio opaco antes de que el medio se “entere” de que su frecuencia es tal que debe ser absorbida y se lo impida, y es la parte posterior del pulso la única que se absorbe y refleja. Al suprimir (¿reprimir?) la parte posterior del pulso, el centroide se adelanta y se produce la impresión de una propagación más rápida que la luz. Sin embargo, es claro que en este proceso no se puede transmitir información superluminalmente; el campo nunca llega más allá de donde hubiera llegado el pulso nominal en ausencia del material.

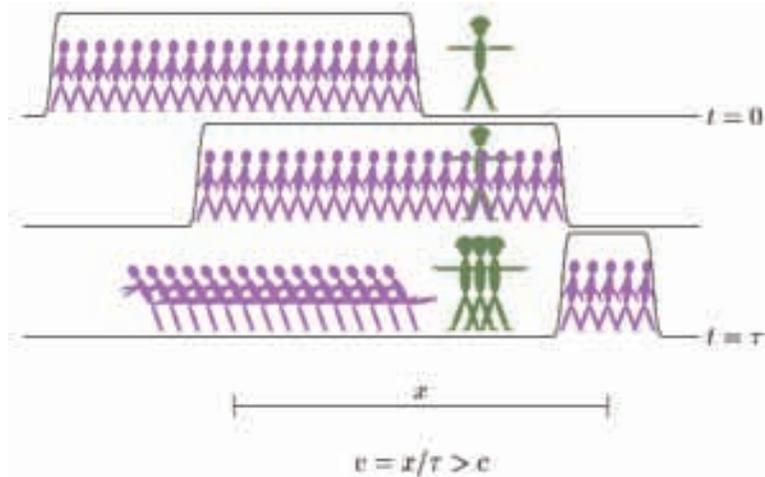


Figura 10. Manifestación superlumínica. Grupo de ciudadanos marchando ($t=0$) antes de pasar frente a un guardia, poco después de sobrepasarlo e inmediatamente después de iniciada la represión ($t = \tau$). Se muestra la distribución de manifestantes y la distancia entre su centroide, antes y después de la represión.

MEDIOS TRANSPARENTES

En cierta clase de experimentos, se ha hallado propagación aparentemente superluminal aún en el vacío, en ausencia de materiales opacos. En la figura 11 mostramos un rayo luminoso que incide sobre un prisma transparente cuya base es un triángulo rectángulo. Dicho rayo incide sobre la hipotenusa del prisma, formando un ángulo θ con respecto a su dirección normal, y emerge al espacio vacío entre ambos prismas con un ángulo θ mayor, dado por la ley de Snell. Para cierto ángulo θ_c , el ángulo “crítico”, la luz transmitida se propaga a lo largo de la superficie $\theta'c = 90^\circ$ y para ángulos superiores, toda la energía electromagnética se refleja, dando origen al fenómeno de la reflexión interna total. Este fenómeno es el responsable de los bellos reflejos que producen las superficies internas de los diamantes, a pesar de su perfecta transparencia. Si colocamos un segundo prisma a una distancia L suficientemente pequeña, el campo electromagnético puede llegar hasta él dando origen a una onda viajera transmitida, cuya existencia “frustra” la reflexión total. Este fenómeno se conoce como reflexión interna total frustrada. Se ha medido (Carey y colaboradores, 2000) la *velocidad* con la que pulsos electromagnéticos

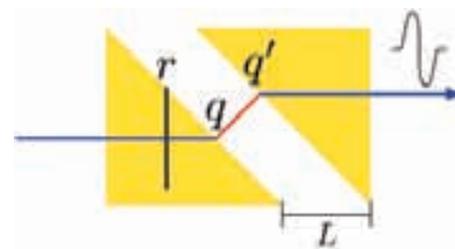


Figura 11. Reflexión interna total frustrada. Un rayo (azul) penetra en un prisma transparente (amarillo) e incide sobre su cara frontal q a un ángulo superior al crítico $\theta > \theta_c$, dando origen a una reflexión total. Sin embargo, hay un campo evanescente transmitido al espacio entre los dos prismas (rojo). Una fracción de dicho campo alcanza al segundo prisma q' y emerge como onda viajera. Se muestra un frente de onda llegando a la cara del primer prisma en r y el pulso saliente al momento de emerger del sistema.

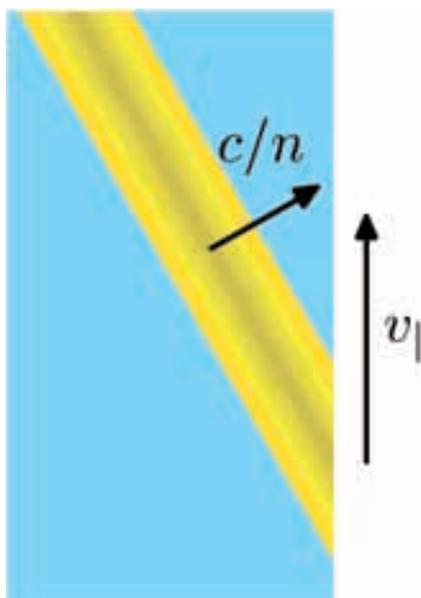


Figura 12. Pulso que incide oblicuamente sobre la superficie de un medio transparente con índice de refracción n . Se indica la velocidad de propagación del pulso y de su intersección con la superficie del medio.

néticos atraviesan la brecha $q-q'$ y se ha reportado una propagación superluminal en distancias macroscópicas de varios milímetros, lo cual inmediatamente hace pensar en posibles aplicaciones y en conflictos con la teoría de la relatividad. Es por ello que se vuelve importante el llevar a cabo un análisis cuidadoso de la superluminidad en la reflexión interna total frustrada.

Para analizar la propagación de pulsos en la reflexión interna total frustrada, en la figura 12 mostramos un pulso que incide desde el interior con cierto ángulo sobre la superficie de un medio transparente. La dirección de propagación del pulso está definida por la normal a sus frentes de onda. Es muy importante notar que para que dicho pulso tenga una *dirección* definida, es necesario que también tenga una *extensión transversal*. De otra manera, no habría una superficie a la cual pudiéramos llamar frente de onda y a lo largo de cuya normal se propague el pulso. Como el pulso es una entidad extendida en la dirección transversal a su dirección de propagación, unas partes del pulso llegan antes que otras a la superficie del medio. Si el pulso se propaga con una velocidad v , su intersección con la superficie se mueve a lo largo de esta última con la velocidad $v_{||} = v/\sin \theta$, como la rompiente de las olas en la playa (figura 7).

Las observaciones anteriores nos proporcionan una nueva interpretación del ángulo crítico θ_c : para $\theta < \theta_c$, $v_{||} > c$, como en el efecto tijera (figura 7), mientras que para $\theta > \theta_c$, $v_{||} < c$. De acuerdo a la construcción de Huygens, cada punto por donde pasa un frente de onda sirve de fuente de ondas secundarias que crecen en el vacío con la velocidad de la luz. Cuando la superficie del prisma es barrida con velocidad $v_{||} > c$, las ondas secundarias centradas en distintos puntos se intersectan entre sí dando origen a una envolvente que forma el frente de la onda transmitida. Sin embargo, cuando $v_{||} < c$, las distintas ondas secundarias no se intersectan, no tienen una envolvente y no dan origen a un frente de onda en la brecha entre ambos dieléctricos. Es esta falta de una envolvente en la que el campo procedente de distintos puntos se suma coherentemente lo que da origen al carácter evanescente de la onda transmitida. Sin embargo, como la superficie es ahora barrida lentamente, hay suficiente tiempo para que las ondas secundarias producidas por puntos lejanos, como r en la figura 11, atraviesen la brecha de aire y lleguen a la vecindad del punto q' al mismo tiempo o aún antes de que la onda incidente pase por el punto q enfrente, como si el campo se hubiera propagado superluminal y acasualmente desde q hasta q' . Por lo tanto, la superluminidad y la

acausalidad en la propagación de pulsos bajo las condiciones de reflexión interna total frustrada es sólo una ilusión que aparece cuando en el análisis no tomamos en cuenta que los frentes de onda son extendidos y que la propagación no se da en la dirección normal a la superficie de los prismas (Mochán y Brudny, 2002).

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos argumentado de diversas maneras que la velocidad de la luz es un límite que no puede ser traspasado. Concurrentemente, hemos descrito fenómenos que muestran movimiento superluminal. En cada uno de estos casos hemos contraargumentado que la información y la energía no se propagan con velocidades mayores que la de la luz en el vacío, y que por lo tanto no debemos preocuparnos por las paradojas a que conduciría la comunicación acausal con nuestro propio pasado. En particular, hemos discutido algunos de los experimentos recientes (Mochán y Brudny, 2000) y hemos mostrado con argumentos cualitativos que al tomar en cuenta la extensión espacial de los pulsos luminosos involucrados, tanto en su dirección de movimiento como en la dirección transversal, la propagación superluminal se convierte en un fenómeno trivial, similar a los efectos asociados a rompientes, tijeras y faros ilustrados en las figuras 6 y 7.

En los últimos meses se han logrado resultados sorprendentes en cuanto a la manipulación de la velocidad con la que se propagan pulsos luminosos. Por un lado se han logrado velocidades ultralentas, de unos cuantos metros por segundo e incluso se ha logrado *detener* el movimiento de la luz durante algunos instantes. Por otro lado, los reportes de propagación superluminal siguen apareciendo con frecuencia, despertando muchas expectativas entre la comunidad científica y entre el público no especializado, por lo que deben ser analizados con sumo cuidado y seriedad para verificar su trascendencia.

Bibliografía

- Huygens, Christian (1994), "Tratado sobre la Luz", en Mortimer J. Adler (editor), *Great Books of the Western World*, vol. 32, Chicago, Britannica.
- Romero-Rochín, V. *et al.* (2001), *Phys. Rev. E* 63, 27601.
- Carey, J. *et al.* (2000), *Phys. Rev. Lett.* 84, 1431.

- Mochán, W. Luis y Vera L. Brudny (2001), *Phys. Rev. Lett.* 87, 119101. En Vera L. Brudny y W. Luis Mochán, *Optics Express* 9(11), 561 (2001) (<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-9-11-561>) se muestra una versión con dibujos animados.
- Mochán, W. Luis y Vera L. Brudny (2000), "¿ $v > c$?", en José Récamier (editor), *Memorias de la VIII Escuela de Verano "La visión molecular de la materia"* (Cuernavaca, Morelos), p. 84. (<http://em.fis.unam.mx/mochan/papers/01edev.html>).

Este trabajo fue apoyado por Conacyt (31120-E), UBACYT y Fundación Antorchas (VLB) y por DGAPA-UNAM (IN110999 e IN117402) (wlm). VLB es miembro de Conicet.

W. Luis Mochán (1955) es investigador en el Centro de Ciencias Físicas de la UNAM (Morelos) donde realiza investigación teórica sobre propiedades ópticas de superficies y de sistemas desordenados. mochan@fis.unam.mx

Vera L. Brudny (1961) es profesora del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires e Investigadora Adjunta del Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas, y realiza investigación teórica sobre difracción, ondas superficiales y óptica no lineal. vera@df.uba.ar