



Recepción: enero 30 de 2002

Aceptación: abril 16 de 2002

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México.

Correo electrónico: mag@coatepec.uaemex.mx
** Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.

Correo electrónico: fujioka@fisica.unam.mx

*** Ciencias básicas, Instituto Tecnológico de Toluca.

Correo electrónico: lceciliano@yahoo.com.mx



John Scott Russell

La antisoledad de la onda solitaria

Máximo Agüero*, Jorge Fujioka** y Leonardo Ceciliano***

Hace más de 150 años, mientras se llevaban a cabo experimentos para determinar el diseño más eficiente de botes para viajar a través de un canal, un joven ingeniero escocés de nombre John Scott Russell (1808-1882) realizaba un extraordinario descubrimiento científico: la onda de transmisión u onda solitaria. Veamos aquí un fragmento de este acontecimiento, descrito en su obra *Reporte sobre ondas* (Russell, 1985: 311-390):

Creo que será mejor introducir este fenómeno describiendo las circunstancias de mi primer encuentro con esto. Estaba observando el movimiento de un bote el cual era jalado rápidamente a lo largo de un estrecho canal por un par de caballos, cuando el bote se detuvo repentinamente, mas no así la masa de agua justo delante de la proa del bote en el canal, la cual, se había puesto en movimiento en un estado de violenta agitación: repentinamente esta masa en agitación empezó a salir hacia delante con gran velocidad, tomando la forma de una larga elevación solitaria, redonda, suave y bien definida de una masa de agua, la cual continuó su curso a lo largo del canal aparentemente sin cambio de forma o disminución de velocidad. La

seguí montado en un caballo, y aún la vi pasar a una razón de algunas ocho o nueve millas por hora, conservando su figura original algunos treinta pies de largo y entre un pie y medio de altura. Pasado un tiempo, su altura gradualmente disminuyó, y después de seguirla una distancia de dos millas, la perdí en unos recodos del canal. Así que en el mes de agosto de 1834, fue mi primera oportunidad de encontrarme con ese singular y hermoso fenómeno, al cual he llamado *Onda de Translación*, un nombre que generalmente ahora se acepta.

Este evento tuvo lugar en el Canal Unión en Hermiston, Escocia, muy cerca del campus Riccarton de la Universidad de Heriot-Watt (Edimburgo).

Russell quedó tan impresionado por el incidente que regresó a su casa y construyó un canal de treinta pies en el jardín trasero de su casa, con el cual podría intentar reproducir y estudiar ondas de agua del mismo tipo. Dedujo que el volumen de agua en la onda era igual al del agua desplazada, y fue capaz de obtener una fórmula que expresaba la velocidad de la onda en términos de la amplitud y profundidad del canal. Encontró que la velocidad de la onda era proporcio-

nal a la amplitud. Y al elevar una masa de agua era capaz de generar una onda de depresión. Sin embargo, dicha onda daba como resultado un tren de ondas dispersivas.

Cuando reportó a la Asociación Británica su descubrimiento sobre la gran onda de translación, varios científicos de su época argumentaron que las ondas de forma permanente no podrían existir. En particular, Airy y Stokes decían que la disminución de la onda era una indicación de que aquéllas no eran permanentes.

Toda su vida Russell estuvo convencido que su onda solitaria (la onda de translación) era de fundamental importancia, pero en aquella época (siglo diecinueve y principios del veinte) los científicos pensaban de otra manera.

Su fama la obtuvo debido a otros logros. Entre algunas de sus muchas y variadas actividades: desarrolló la línea de onda, un sistema de construcción de cascos de barcos que revolucionó la arquitectura naval en el siglo diecinueve, y se le otorgó la medalla de oro de la Sociedad Real de Edimburgo en 1837. Comenzó a operar el servicio de transporte de vapor entre Glasgow y Paisley en 1834, e hizo la primera observación experimental del efecto Doppler con las ondas sonoras producidas al pasar un tren. Reorganizó la Sociedad Real de Artes; fundó la Institución de Arquitectos Navales, y en 1834 fue electo socio de la Sociedad Real de Londres. Diseñó (con Brunel) y construyó el barco *Great Eastern*; diseñó también el *Vienna Rotonda* y ayudó a planear el primer arsenal de barcos de guerra británico (el *Warrior*). Asimismo, desarrolló un plan de estudios para la educación técnica en Bretaña, y recientemente llegó a saberse que intentó negociar la paz durante la Guerra Civil de Estados Unidos.

No fue sino hasta el año de 1870 cuando la onda permanente pudo ser explicada por Boussinesq y Rayleigh, quienes de manera independiente derivaron expresiones matemáticas para la forma y velocidad de tales ondas. En 1895, Diederik Johannes Korteweg y su estudiante Gustav de Vries obtuvieron una ecuación satisfactoria que describe el perfil de la onda. Esta ecuación estaba basada en la suposición de que la profundidad del agua es pequeña en comparación con la anchura de las ondas y relaciona la amplitud de la onda y sus cambios en el espacio con el cambio de la amplitud en el tiempo. La ecuación ha sido llamada de Korteweg-de Vries (o

ecuación KdV), y es hoy por hoy una de las ecuaciones clásicas del mundo no lineal.

1. Las ondas solitónicas

A mediados de 1960 los científicos comenzaron a usar computadoras digitales para estudiar la propagación de ondas no lineales, y fue entonces cuando las primeras ideas de Russell empezaron a ser apreciadas. Russell vio a la onda solitaria como una entidad dinámica autosuficiente, una entidad que mostraba propiedades de partícula. Desde la perspectiva moderna, esto es usado como un elemento constructivo para formular comportamientos dinámicos complejos de sistemas de ondas en toda la ciencia: desde hidrodinámica hasta óptica no lineal, desde plasmas hasta colisiones de ondas, desde tornados hasta la gran Mancha Roja de Júpiter, desde partículas elementales de la materia hasta partículas elementales del conocimiento.

Cada tipo de movimiento posible de las ondas ha sido estudiado, incluyendo los que resultan de la vibración de cuerdas, ondas de presión, ondas de agua y ondas electromagnéticas. De hecho, la mayor parte de la información que recibimos viene del movimiento de ondas. Procesamos información de lo que vemos y oímos. El sonido llega a nuestros oídos a través de ondas en el aire y somos capaces de leer este texto debido a las ondas de luz que rebotan de la página. Hoy en día contamos con mucha información que recibimos de la radio y la televisión, la cual llega a nosotros en forma de ondas electromagnéticas.

Existen ahora varias definiciones de solitón, dependiendo de las áreas en que el investigador trabaja, pero la idea central de este concepto se manifiesta en todas sus definiciones. Así, por solitón nosotros conceptuaremos a una onda solitaria en forma de un pulso que es capaz de trasladarse sin cambio de forma y sin pérdidas de energía, y además es capaz de conservar su estructura después de un choque con su semejante, es decir, con comportamiento tipo partícula.

En los años sesenta dos físico-matemáticos de la Universidad de Princeton, Norman Zabusky y Martin Kruskal, descubrieron la existencia de un tipo de ondas localizadas muy especiales, que exhibían un comportamiento tipo partícula. Es decir, cuando dos de estas ondas interactúan, salen de la colisión con su identidad intacta, y solamente con un pequeño cambio de fase. Las llamaron ondas solitrónicas, pero como este término ya se usaba en patentes industriales, tomaron el nombre de solitones. Este término fue elegido para estar en concordancia con el nombre de las partículas elementales, tales como electrón, protón, fotón, etc. Como un comportamiento tipo partícula era inusual en

Por solitón nosotros conceptuaremos a una onda solitaria en forma de un pulso que es capaz de trasladarse sin cambio de forma y sin pérdidas de energía, y además es capaz de conservar su estructura después de un choque con su semejante, es decir, con comportamiento tipo partícula.

ondas no lineales, Zabusky, Kruskal y sus colegas buscaron entender a estos solitones. Como resultado de sus esfuerzos, dos años más tarde encontraron un método para resolver la ecuación KdV, que explicaba la dinámica del solitón. No pasaría mucho tiempo antes de que otros investigadores encontraran la presencia de solitones en otros sistemas y empezaran a aplicar técnicas similares.

2. Solitones y avance técnico

2.1. Fibra óptica

En la década de los setenta tuvieron lugar tres acontecimientos independientes: uno proveniente de la ciencia de materiales, otro de las matemáticas, y otro de la física clásica, que al conjuntarse habrían de revolucionar la tecnología de las telecomunicaciones y acrecentarían enormemente el interés por los fenómenos no lineales.

El primero de estos acontecimientos fue la aparición (en 1970) de un nuevo tipo de fibras ópticas, capaces de conducir señales luminosas a lo largo de distancias mucho mayores que las fibras anteriores.

Las primeras fibras ópticas se fabricaron de vidrio. El principio físico usado en estos dispositivos es el principio de reflexión interna total, lo que fue demostrado por primera vez por John Tyndall en 1870. Cuando la luz viaja por diferentes medios con diferentes índices de refracción, hay un ángulo de incidencia crítico abajo del cual la luz será totalmente reflejada al primer medio sin que la luz penetre en la interfase.

En 1950 el diseño de las fibras ópticas fue notoriamente mejorado al introducirse un revestimiento. La fibra forrada estaba construida por un centro de vidrio, rodeado por un material con un índice de refracción un poco menor que el del centro. Como la fibra tiene una sección transversal muy pequeña, el ángulo de incidencia de cualquier rayo de luz que se propague por ella será menor que el ángulo crítico necesario para producir reflexión interna. En consecuencia, la luz no podrá escapar del interior de la fibra hasta que llegue al final.

El principal inconveniente al usar fibras ópticas es la pérdida de información a lo largo de la fibra, debido, entre otros aspectos, a impurezas absorbentes que hacen que la luz se atenúe. La atenuación de la intensidad luminosa se mide en decibelios (dB) por unidad de longitud. Como es obvio, los solitones son entidades físicas que aparecen del delicado balance de fuerzas antagónicas y en modelos ideales de la materia. En casos reales como en la fibra óptica, este balance es una aproximación porque no es un material ideal en donde se observen estos balances.

La pérdida de información en fibras ópticas se debe a varios fenómenos físicos, como se mencionó, y depende también de la longitud de onda de la luz. Comúnmente las pérdidas ocurren debido a la absorción; y para entender estas pérdidas, es necesario indagar cómo las ondas de luz interactúan con la materia.



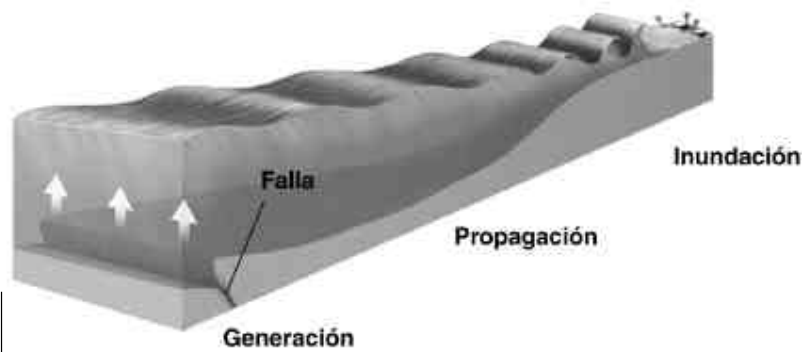
La estructura delta coherente de las aves emigrantes nos recuerda también a los solitones. En efecto, aquí hay una conjunción cooperativa de esfuerzos entre las aves débiles y fuertes para viajar a grandes distancias.

Para un entendimiento correcto y riguroso del proceso de atenuación, es necesario recurrir a la mecánica cuántica, pero nosotros nos limitamos a presentar una explicación cualitativa del fenómeno. Las fibras ópticas están hechas de un material dieléctrico, en el cual los electrones están fuertemente atados a los núcleos. Cuando las ondas electromagnéticas pasan a través del dieléctrico, interactúan con los electrones y el electrón responde como si se uniera a los núcleos mediante un resorte. La onda incidente desplazará al electrón de su posición de equilibrio, creándose así un dipolo oscilante. Estos dipolos oscilantes se comportan como una antena de radio en miniatura, que emite ondas electromagnéticas en todas direcciones, y a la misma frecuencia de la onda incidente. Esta reemisión de radiación electromagnética es llamada dispersión de Rayleigh, en honor a su descubridor John William Rayleigh.

Las fibras con revestimiento anteriores a 1970 tenían pérdidas de 1,000 dB/km, lo cual implicaba que la intensidad luminosa disminuía a 1/10 de su intensidad inicial tras haber recorrido 10 m a lo largo de la fibra. En 1970, sin embargo, se lograron construir fibras de sílica (óxido de silicio) con pérdidas de 20 dB/km, las cuales permitían la transmisión de señales luminosas a través de distancias 50 veces mayores que con las antiguas fibras. Las nuevas fibras empezaban a ser prometedoras desde el punto de vista de las telecomunicaciones, pero todavía tenían que superar el problema de los pulsos luminosos, que tendían a ensancharse debido a la dispersión. Este hecho es bastante perjudicial, ya que pulsos claramente separados en el transmisor podrían empezar a superponerse antes de llegar al receptor, causando que la información transmitida llegara distorsionada.

2.2. Ecuación de Schrödinger

En 1971 ocurrió el segundo acontecimiento crucial de esa década: dos investigadores de la Academia de Ciencias de la URSS, Zakharov Vladimir Euguenievich y Shabat Aleksei Borisovich, descubrieron que había otra ecuación interesante que también tenía solitones: la



Los tsunamis, ondas que surgen como consecuencia de fallas tectónicas en alta mar, son también solitones. Cuando se acercan a la orilla su amplitud aumenta hasta volcarse y causan estragos. Imagen tomada de *Scientific American* (mayo, 1999).

que hoy conocemos como ecuación no lineal de Schrödinger (NLS). El descubrimiento de Zakharov y Shabat era matemáticamente interesante, pero en ese momento parecía no tener relación alguna con las telecomunicaciones.

2.3. Solitones ópticos

El tercer acontecimiento ocurrió en 1973, cuando Akira Hasegawa y Frederick Tappert (dos investigadores de los Laboratorios Bell), encontraron que teóricamente era posible transmitir pulsos luminosos de cortísima duración sin ninguna dispersión a través de fibras ópticas con ciertas características, y que la propagación de tales pulsos estaba gobernada por la ecuación NLS. El descubrimiento de Hasegawa y Tappert constituyó así el lazo de unión entre las matemáticas de los solitones con la tecnología de las fibras ópticas.

Con el descubrimiento de Hasegawa y Tappert quedó claro que las fibras ópticas tenían verdaderamente posibilidades de ser usadas en las telecomunicaciones. Sin embargo, era necesario disminuir aún más el atenuamiento en las fibras, y desarrollar láseres capaces de producir los cortísimos pulsos necesarios para las aplicaciones en telecomunicaciones. En 1979, T. Miya, Y. Terunuma, T. Osaka y T. Miyashita (del Ibaraki Electrical Communication Laboratory, en Japón) lograron obtener fibras ópticas con una constante de atenuación de 0.2 dB/km (para una longitud de onda de 1550 nm), las cuales podían conducir la luz a lo largo de 50 km de fibra antes de que la intensidad luminosa decayera a 10% de su valor inicial. Un año después, en 1980, Linn Mollenauer, Richard Stolen y John Gordon (de los Laboratorios Bell) lograron transmitir solitones ópticos de 7 ps de duración a lo largo de este tipo de fibras.

Los exitosos resultados de Mollenauer, Stolen y Gordon, junto con las nuevas fibras con atenuaciones de 0.2 dB/km, dejaron libre el camino para que las fibras ópticas revolucionaran la tecno-

logía de las telecomunicaciones. Para tener una idea de la rapidez con que las fibras ópticas desplazaron a los cables metálicos de las telecomunicaciones, basta observar que si bien el séptimo cable submarino Transatlántico (el TAT-7) colocado en 1983 era todavía metálico, el siguiente cable transatlántico (el TAT-8), que se puso en operación en 1988, era ya de fibra óptica.

La siguiente información nos da idea de la superioridad de las fibras ópticas sobre los cables metálicos (para usos en telecomunicaciones):

a) En un cable metálico la máxima frecuencia que puede tener la onda portadora es aproximadamente de 60 MHz,

ya que para frecuencias más altas la señal se atenúa demasiado rápido.

b) Cada conversación telefónica requiere de un rango de frecuencias de 4 kHz, de manera que por un cable metálico se pueden transmitir aproximadamente 15 mil conversaciones simultáneas ($15,000 = 60 \text{ MHz} / 4 \text{ kHz}$).

c) En un cable submarino moderno (por ejemplo el TAT-12, tendido en 1996) es posible transmitir pulsos luminosos a una velocidad de 5 Gbits/s (es decir, cinco mil millones de pulsos por segundo).

d) Una conversación telefónica requiere alrededor de 60 kbits/s, de manera que el TAT-12 puede transportar aproximadamente 80 mil conversaciones simultáneas ($80,000 \approx 5 \text{ Gbits} / 60 \text{ kbits}$).

Actualmente se están diseñando sistemas de telecomunicaciones de fibras ópticas cuyas velocidades de transmisión parecen de 'ciencia ficción'. Existe un proyecto de telecomunicaciones a escala mundial, conocido como Proyecto Oxígeno, que planea usar 16 longitudes de onda diferentes, cada una de ellas con transmisión a una velocidad de 10 Gbits/s. Por lo tanto, cada fibra transmitirá 160 Gbits cada segundo.

3. Biosolitones

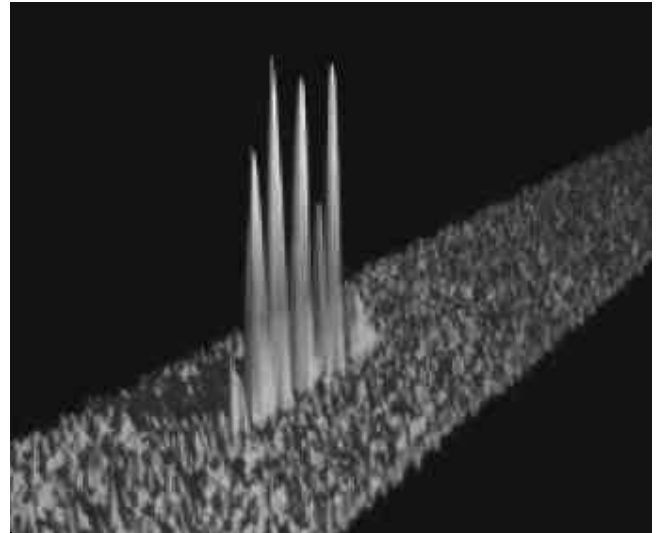
Así como en óptica, en muchas otras ramas de la ciencia se encuentran los enigmáticos solitones, los cuales posiblemente jugarán un papel relevante para entender más el misterioso mundo en el cual estamos inmersos. Por otra parte, es probable que haya un sinnúmero de aplicaciones tecnológicas que podrían utilizar a los solitones. Ya se perfilan investigaciones en donde el enigma de la existencia de la vida se trata de explicar mediante el comportamiento de ondas en todos los niveles de organización de la materia.

Los biosolitones son las nuevas entidades que tienen aplicaciones en ondas neuronales, en el ADN, etc. También se están

investigando como los responsables de la locomoción en seres vivos; incluso cuando se mapea en un espacio configuracional apropiado la locomoción del tipo de la marcha de los bípedos, por ejemplo, se encuentra que en este nuevo espacio, la marcha no es más que un ejemplo de comportamiento solitónico. La naturaleza provee a los seres vivos de órganos para huir de los depredadores, pero al hacer esto se debe de gastar la mínima cantidad de energía posible. ¿Qué mecanismo natural podría reunir este tipo de cualidades? La respuesta está en los solitones: las ondas musculares que hacen reptar u ondular el cuerpo de las culebras, por ejemplo, deben de tener naturaleza solitónica porque los solitones se trasladan sin pérdida de forma o velocidad, y además mantienen constante la energía.

Es interesante observar que los solitones surgen como una combinación armónica de tendencias que, por sí solas, serían destructivas. Consideremos, por ejemplo, el caso de la propagación de pulsos luminosos en fibras ópticas. En este tipo de sistemas hay dos procesos fundamentales que gobiernan el comportamiento de los pulsos: un *proceso dispersivo*, que tiende a ensanchar los pulsos, y un *proceso no lineal* (cuando la intensidad del campo se acrecienta) que tiende a modificar de manera continua la frecuencia de la ondas que conforman el pulso. Por sí solos, cada uno de estos procesos tiende a deteriorar la calidad de los pulsos. Sin embargo, al combinarse de manera adecuada, estos dos procesos parecen cancelarse mutuamente, alcanzando un equilibrio sorprendente. Es interesante observar aquí que el *proceso no lineal* no tiene la apariencia de ser un proceso contrario al *proceso dispersivo*, ya que su efecto no es adelgazar a los pulsos. Es, pues, una sorpresa que estos dos procesos se equilibren entre sí.

Observar, pues, que dos procesos que por sí solos serían destructivos pueden armonizarse para producir una entidad esta-



Ondas atómicas o solitónicas en el condensado de Bose-Einstein.
Scientific American, mayo, 2002.

ble, y en cierto modo *eterna*, es una enseñanza que nos podría ser de utilidad en múltiples situaciones.

Cuando el artículo estaba ya en forma de galeras, se recibió la fantástica noticia (*The American Institute of Physics Bulletin of Physics News*. Number 588. May 9, 2002) de que Randall G. Hulet y colaboradores de la Rice University, USA, han observado solitones brillantes (ver ilustración) en el condensado de Bose Einstein (BEC) (el cuarto estado de la materia). Como el BEC consiste de átomos (en este caso de Lithium) ultrafríos, todos ubicados en el mismo estado cuántico, éste exhibe propiedades ondulatorias y por lo tanto puede considerarse como una onda atómica. La aplicación tecnológica de estos solitones en el BEC ayudaría a crear versiones BEC de giroscopios para una navegación ultra precisa y la creación de relojes atómicos exactos.

D. B. E.

Para ahondar más en el tema se sugiere revisar la siguiente bibliografía

Agüero, M. y J. Martínez (1995). "El misterio solitónico", *Ciencia ergo sum*, Vol. 2, Núm. 2. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
Bishop, A. R. y T. Schneider (1978). *Solitons and Condensed Matter Physics*. Springer Verlag, New York.

Briggs, J. y F. D. Peat (1991). *Espejo y reflejo*. Editorial Gedisa, Barcelona.
Filippov, A. B. (2000). "The Versatile Soliton", *Scientific American*. Berlín.
González, F. I. (1999). "Tsunamis", *Scientific American*. May.

<http://www.ma.hw.ac.uk/solitons/>
Russell, S. (1845). "Reporte del decimocuarto encuentro de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia", York, septiembre de 1844 (Londres), pp. 311-390, láminas XLVII-LVII.