

# GLOBALIZACIÓN Y CIENCIA: LA VISIÓN DE UN FÍSICO

## RAMAMURTI SHANKAR

Es licenciado en Ingeniería Eléctrica en 1969 por el Indian Institute of Technology de Chennai. Se doctoró en 1974 en Física de Partículas Elementales en la Universidad de California, Berkeley. Tras ser miembro durante tres años de la Harvard Society of Fellows, se incorporó al Departamento de Física de Yale, que dirigió entre 2002 y 2007, y donde hoy ocupa la cátedra John Randolph Huffman de Física y Física Aplicada.

Es autor de dos libros: *Basic Training in Mathematics* y *Principles of Quantum Mechanics*. Actualmente trabaja aplicando técnicas de la Física Cuántica a la Física de la Materia Condensada. Es miembro de la American Physical Society, consejero del Aspen Center for Physics y ganador, en 2009, del premio Lilienfeld de la American Physical Society. Sus conferencias de introducción a la Física y sus materiales docentes —como sus exámenes y las soluciones correspondientes— están disponibles de forma gratuita en <http://oyc.yale.edu/physics>. Sus conferencias también están en sitios web como YouTube.

Según la Wikipedia, de donde obtengo la mayoría de los datos últimamente, *globalización* se define como el proceso por el cual se integran fenómenos locales, regionales o nacionales en una escala global.

Un ejemplo común es la globalización económica: la integración de las economías nacionales en la economía internacional mediante el comercio, la inversión directa en el extranjero, los flujos de capital, la inmigración y la difusión de tecnologías.

Definida en términos generales, la globalización del comercio no es algo nuevo. La humanidad lleva siglos comerciando a través de fronteras nacionales y regionales, desde los fenicios hasta los polinesios, desde la legal ruta de la Seda hasta la ilegal ruta del Opio. Sin embargo, el término *globalización* actualmente hace referencia al explosivo crecimiento de esta actividad como consecuencia de los rápidos avances en tecnología, transporte y comunicaciones.

Mi intención es centrarme en la globalización de la ciencia, y me limitaré a mi propia especialidad, la Física, y a mis propias experiencias, puesto que son lo único acerca de lo que puedo escribir con cierta seguridad. Los editores de este volumen me aseguran que una perspectiva así de restringida no está fuera de lugar en él. Creen que lo que le falta en amplitud se compensa al aportar el punto de vista único de alguien que está en la lucha diaria, alguien que se dedica a la ciencia para vivir. A lo largo de mi exposición recurriré a algunos conceptos físicos. Espero que el lector no se los salte, ya que me he esforzado especialmente por volverlos accesibles a un público amplio y resultan imprescindibles para poder entender en su totalidad el resto del texto.

Cualquiera puede comprender con facilidad los motivos del comercio de mercancías. Comerciamos con otros países porque ellos tienen lo que necesitamos, y viceversa. Uno quiere mi algodón para transformarlo en tejido en sus fábricas, y otro convertirá el tejido en camisetas que probablemente acabará vendiéndome a mí. ¿Qué ha sucedido en términos físicos? ¿Cómo ha evolucionado este intercambio a lo largo de los años, y sobre todo durante las dos últimas décadas? Ése es el tema del que trataré.

Para ir preparando el terreno, me gustaría hablar de cómo los físicos llevan a cabo su trabajo.

A grandes rasgos, podríamos dividir esta comunidad en dos categorías: los experimentales y los teóricos.

Los experimentales son aquellos que construyen y desarrollan aparatos de medición y recogen datos sobre fenómenos físicos. Pueden estudiar hechos naturales, como la explosión de estrellas y la órbita de los planetas, o bien objetos diseñados en sus laboratorios, como un trozo de alambre enfriado a temperaturas ultrabajas para analizar su resistencia o partículas producidas en un acelerador, que convierte

la energía de los proyectiles acelerados en materia. Luego resumen sus resultados en forma de regularidades e imprevistos que necesitan ser explicados.

Por su parte, los teóricos intentan permanecer apartados de la maquinaria frágil, y se consagran a explicar los fenómenos observados basándose en leyes conocidas o inventando otras nuevas.<sup>1</sup> La drástica división entre teóricos y experimentales es algo reciente, una consecuencia de la extrema complejidad de los aparatos de medición. Hay ejemplos de otros tiempos, como Newton, quien llevó a cabo experimentos con la luz, y Galileo, quien estudió los sistemas mecánicos y exploró planetas y satélites con su telescopio. De tiempos más recientes podríamos citar a Enrico Fermi (1901-1954; premio Nobel en 1938), quien sin ningún esfuerzo pasaba de la teoría a la experimentación (aunque debo reconocer que se trata de una excepción).

Para ilustrar esa interacción entre teóricos y experimentales recurriré a dos de sus mejores representantes: Johannes Kepler (1571-1630) como experimental e Isaac Newton (1643-1727) como teórico. No todos los ejemplos son tan prestigiosos, pero voy a usar estos dos porque los fenómenos físicos que estudiaron son fáciles de visualizar.

Kepler, que aceptaba la teoría heliocéntrica de Nicolás Copérnico (1473-1543), estudió el movimiento de los planetas para dar respuesta a varias cuestiones muy específicas: ¿qué forma tienen las órbitas alrededor del Sol?; ¿qué relación existe entre el tamaño de una órbita y el tiempo  $T$  que el planeta tarda en dar una vuelta completa? Después de cuarenta años de laboriosa recopilación de datos, en torno a 1605 condensó sus hallazgos en las tres leyes siguientes.

Primera ley: «Todo planeta describe una órbita elíptica alrededor del Sol, con el Sol situado en uno de sus focos» (Figura 2).

Recordemos la definición de *elipse*. Al igual que el círculo es el lugar geométrico de un punto que se mueve en la medida en que su distancia desde un punto fijo (el centro) sea un número fijo (el radio), una elipse es el lugar geométrico de un punto  $P$  que se mueve en la medida en que  $SP + S'P$ —la suma de sus distancias respecto a dos focos determinados ( $S$  y  $S'$  en la figura 2)— sea constante. Por eso para trazar una elipse colocamos dos chinchetas, una en  $S$  y otra en  $S'$ , atamos cada uno de los extremos de una cuerda a  $S$  y a  $S'$  respectivamente, colocamos un lápiz en un punto  $P$  y lo movemos a su alrededor, manteniendo la cuerda tensa. Si  $S$  y  $S'$  coinciden, conseguiremos un círculo de radio  $SP$ . El tamaño de la elipse lo determina  $R$ , el eje semimayor, que es la mitad de la distancia  $CA$ . Cuando la elipse llegue a ser un círculo,  $R$  será su radio.

**GRACIAS A LA UNIVERSALIDAD DE LAS LEYES Y LOS FENÓMENOS NATURALES, LOS FÍSICOS DE LA INDIA, JAPÓN Y POLONIA DEDUCEN LAS MISMAS LEYES Y EXPLORAN LOS MISMOS FENÓMENOS QUE LOS DE GROENLANDIA O ISLANDIA.**

<sup>1</sup> Se dice del gran teórico Wolfgang Pauli (1900-1958; premio Nobel en 1945) que su mero paso en tren por una ciudad coincidió con una explosión en un laboratorio físico de esa localidad.

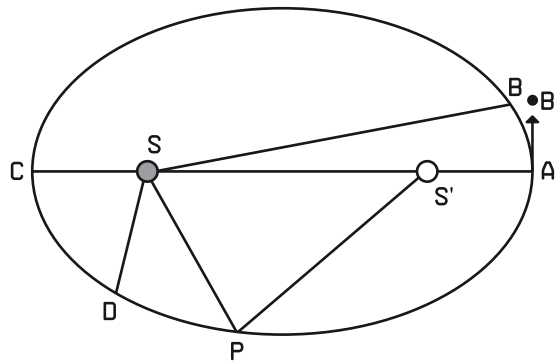
FIGURA 1

Galileo Galilei.



FIGURA 2

Órbita elíptica de un planeta alrededor del Sol (mirando hacia el sistema solar). El Sol está en un foco  $S$  (punto gris), y en el otro foco,  $S'$  (punto blanco), no hay nada. Si el Sol ( $S$ ) no existiera, el planeta  $A$ , desplazándose hacia la parte superior o norte de la página, llegaría a  $B'$  en una semana. Sin embargo, el Sol lo atrae hacia  $B$ .



Segunda ley (Ley del Área): «El planeta barre áreas iguales en tiempos iguales».

La noción de *área barrida* es la siguiente: consideremos en la figura 2  $A$  y  $B$ , que corresponden a dos posiciones del planeta distantes un tiempo fijo (pongamos una semana) en su órbita, y  $C$  y  $D$  también como puntos distantes una semana, pero en un momento diferente —en la figura 2 hemos elegido seis meses más tarde (el tiempo de traslación de una semana y el periodo de seis meses entre comparaciones sólo tienen un fin ilustrativo, y pueden ser arbitrarios)—; la ley dice que el área de barrido  $SAB$  (acotada por la línea  $SA$ , el arco  $AB$  y la línea  $BS$ ) durante la primera semana sería igual al área  $SCD$  recorrida en el segundo periodo de una semana.

Tercera ley: «La relación  $T^2/R^3$  implica que el periodo de tiempo y el tamaño de la órbita son iguales para todos los planetas».

Por ejemplo, para la Tierra el tiempo orbital  $T$  es de  $3,156 \cdot 10^7$  segundos (un año),  $R$  es  $1,496 \cdot 10^{11}$  metros y la relación  $T^2/R^3$  es  $2,977 \cdot 10^{-19}$ .

Para Marte  $T$  es  $5,931 \cdot 10^7$  segundos,  $R$  es  $2,278 \cdot 10^{11}$  metros y la relación  $T^2/R^3$  es  $2,975 \cdot 10^{-19}$ . El resto de los planetas obedece estrictamente a la misma ley.

Ahora pasemos a la explicación que da Newton de las regularidades descubiertas por Kepler. Para ello recurre a dos de sus hallazgos: las leyes del movimiento y la Ley de la Gravitación Universal.

Supongamos que sabemos que el planeta está en  $A$  y se desplaza hacia el Norte a la velocidad que muestra la flecha de  $A$ . Necesitamos saber qué sucederá en el futuro. Éste es un típico problema de Mecánica. Newton da una respuesta completa a la cuestión, pero empleando muchos ingredientes. En primer lugar, supongamos que el Sol no existe. ¿Qué haría el planeta una semana después? Podríamos pensar que el planeta se desplazaría a lo largo de la dirección inicial de su movimiento durante una cierta distancia hasta detenerse, como sucede con cualquier cosa en la Tierra que no esté siendo empujada activamente. Esta parada paulatina se debe a la fricción. Por el contrario, ninguna fuerza estaría actuando sobre el planeta (recordemos que sigue sin haber Sol), y éste se movería siempre en la misma dirección y a la misma velocidad. Ésta es la primera ley de Newton, el Principio de Inercia. Galileo también la conocía, pero Newton fue un poco más lejos, y se preguntó qué haría falta para alterar la velocidad de un cuerpo, es decir, para acelerarlo. Y la respuesta fue «una fuerza». Newton cuantificó la relación entre la fuerza  $F$  (la causa) y la aceleración  $a$  (el efecto) con la Segunda Ley del Movimiento:  $F = ma$  (1).

Esta ley nos dice que para que un cuerpo adquiera una aceleración  $a$  tiene que estar sometido a una fuerza  $F$  igual al producto de su masa  $m$  por la aceleración. Esta ecuación no especifica la naturaleza de dicha fuerza. Podría ser, por ejemplo, de origen eléctrico o gravitatorio. O también podría ser que alguien empujara el cuerpo. No nos dice qué fuerza actúa sobre el cuerpo en un momento determinado. Descubrir qué fuerzas actúan sobre un cuerpo en una determinada situación es la segunda parte de la aplicación de esta ley de Newton (1). Es un proceso inacabado, ya que siempre se están descubriendo nuevas fuerzas. Por ejemplo, sabemos que dos protones experimentan otra fuerza además de la gravitatoria y la eléctrica: se trata de la fuerza nuclear. En todo caso, si sabemos que de algún modo una fuerza está actuando sobre un cuerpo, con esta ecuación podremos hallar su aceleración.

Pero volvamos a los planetas.

Dado que el planeta está acelerándose, una fuerza debe de estar actuando sobre él. ¿De dónde procede dicha fuerza, ya que aparentemente no

hay ningún agente en contacto con él que la pueda ejercer (si quiero mover un piano, no puedo hacerlo sentado a tres metros de distancia: tengo que apoyarme contra él y empujar)? Pues bien, aquí Newton se atrevió a postular una fuerza que actúa a través del espacio, una *acción a distancia*. Su Ley de la Gravitación Universal nos dice que dos cuerpos cualesquiera, de masas  $M$  y  $m$ , situados a  $r$  metros de distancia ejercen una fuerza de atracción recíproca tal que  $F = GMm/r^2$  (2), donde  $G$  es la constante gravitatoria, igual en todos los casos.

Ésa es la fuerza que ejerce el Sol sobre el planeta hacia la izquierda (el oeste de la figura 2). Pero es también la fuerza que ejerce la Tierra sobre el Sol (hacia el este de la figura 2). Sin embargo, los efectos de esa misma fuerza sobre el Sol y sobre la Tierra son bastante diferentes debido a la diferencia entre las masas  $M$  y  $m$ . Para expresarlo con una excelente aproximación, el Sol apenas se mueve, mientras que las órbitas de los planetas alrededor del Sol parecen fijas. Por eso decimos que la manzana *cae* hacia la Tierra, cuando en realidad cada una de ellas *cae* hacia la otra. Las fuerzas que actúan sobre ambas son iguales y opuestas, pero la aceleración de la Tierra es de  $F/M$ , mientras que la de la manzana es de  $F/m$  (en ambas expresiones  $F$  tiene un valor idéntico). Por eso la manzana lleva a cabo la mayor parte del movimiento.

Combinando las ecuaciones (1) y (2) obtenemos ( $G Mm/r^2 = ma$ ) (3).

Si en la ecuación (3) le damos a  $M$  un valor igual a la masa del Sol, y a  $m$  uno igual a la del planeta, y  $r$  es la distancia  $SA$  de la figura 2, tenemos la aceleración cuando el planeta está en  $A$  (podríamos hacer esto también en cualquier otro momento del recorrido del planeta).

¿Cómo podríamos averiguar lo que va a hacer el planeta a continuación usando esta ecuación? Para ello necesitamos saber cálculo. En todo caso, he aquí una modesta aproximación, en caso de que no sepamos cálculo. Tomando la posición y la velocidad iniciales en  $A$ , podemos estimar su posición y velocidad una semana después de la siguiente manera:

1. Por definición, la velocidad es la relación del cambio de posición con el tiempo, de lo que se sigue que el cambio de posición en una semana será la velocidad en  $A$  multiplicada por una semana (expresada en segundos, en caso de que la velocidad se dé en metros por segundo).
2. Partiendo del hecho de que la aceleración es la relación del cambio de velocidad con el tiempo, multiplicamos por una semana la aceleración (producida por la fuerza gravitatoria cuya mag-

nitud y dirección conocemos en  $A$  para predecir su nueva velocidad después de una semana. La nueva velocidad tendrá una ligera inclinación hacia el Noroeste, debida a la aceleración.

3. A partir de la nueva posición y la nueva velocidad después de una semana, repetimos la operación para obtener el resultado al final de dos semanas, y así sucesivamente. Seguiremos haciéndolo para cada semana, hasta conectar los 52 puntos.

Con este procedimiento observamos ya un problema: predice que una semana después el planeta acabará verticalmente sobre  $A$ , cerca de  $B'$ , porque la velocidad inicial en  $A$  era vertical (su velocidad se orientará ligeramente al Noroeste debido a la aceleración). Pero se supone que estaría en  $B$ , y no en  $B'$ , y moviéndose a lo largo de la tangente de la elipse. *El problema consiste en que hemos supuesto, ingenuamente, que la velocidad y la aceleración iniciales iban a permanecer iguales durante una semana.* Sería más exacto recalcular la posición y la velocidad cada minuto o, mejor aun, cada segundo (o en unidades sucesivamente más pequeñas). Lo ideal para obtener la respuesta correcta es ir actualizando los datos continuamente.

Esto es exactamente lo que el cálculo, otro invento de Newton (que lo desarrolló al mismo tiempo que Gottfried Wilhelm Leibniz, aunque cada uno lo hizo por su lado), hace por nosotros. En este lenguaje  $ma = (G Mm/r^2)$  (3) asumiría la forma:

$$m \frac{d^2r}{dt^2} = \frac{GMm}{r^2} \hat{r} \quad (4)$$

El objeto situado a la izquierda es la segunda derivada de la posición  $r$  (la relación de cambio calculada continuamente), y  $\hat{r}$  es el vector unitario a lo largo de la posición de la partícula. No espero que alguien que no esté familiarizado con el cálculo pueda seguir este último paso. No es imprescindible: basta con saber que desde este momento se trata de un problema de matemática pura. Podemos pasarle la pelota al departamento de Matemáticas, a menos que seamos Newton, en cuyo caso inventaríamos las matemáticas necesarias para resolver estas ecuaciones.

Su solución (difícil incluso hoy, tras trescientos cincuenta años de cálculo) fue un triunfo completo. Reprodujo todos los resultados que había observado Kepler: la órbita era una elipse cerrada, se barrían áreas iguales en tiempos iguales y  $T^2/R^3$  resultó ser igual para todos los planetas. Newton no sólo pudo demostrar que  $T^2/R^3$  tenía el mismo valor para todos los planetas, sino que nos llegó a decir *cuál* era ese número igual en términos de otras cantidades conocidas, como  $G$  y  $M$  (la masa del Sol). Descubrió que  $T^2/R^3 = (4\pi^2/GM)$  (5).

**LOS TEÓRICOS NO SIEMPRE SIGUEN A LOS EXPERIMENTADORES EN LA EXPLICACIÓN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS. A VECES ANTICIPAN O PREDICEN UN FENÓMENO (POR EJEMPLO, UNA NUEVA PARTÍCULA) ANTES DE HABERLO VISTO.**





FIGURA 3

Chandrasekhara Venkata Raman.

Aunque el lector no sea capaz de seguir todos los detalles intermedios, sí podrá comprender un aspecto del resultado: en la ecuación (3) —o (4)— la masa del planeta  $m$  se cancela en ambos lados. Como la única referencia al planeta es a través de  $m$ , las propiedades orbitales que se seguirán de la solución de la ecuación ya no dependen del planeta, como podemos ver en ambos lados de la ecuación (5).

Si demostrar las tres leyes de Kepler ya era un problema, Newton todavía añadió dos más de su propia cosecha:  $F = ma$  y  $F = GMm/r^2$ . Después de todo, cuando citamos una ley no la demostramos, sino que se enuncia basándose en muchos experimentos. Si fuera posible enunciar una ley por cada fenómeno observado, cualquiera podría hacerlo recurriendo a una ley que dijese de cada fenómeno que éste se produce del modo en que lo hace. Así que la prueba de fuego para una ley es que pueda explicar muchas cosas.

Y eso es lo que pasa con Newton. Sus leyes del movimiento y la gravitación explican una enorme cantidad de cosas aparte del movimiento de los planetas, a saber, la manzana que cae, la Luna, las mareas, las estrellas binarias, la formación de las galaxias y todos los fenómenos mecánicos, desde los viajes espaciales a la Luna hasta el juego de billar. Por otro lado, las leyes de Kepler, pese a su gran importancia, no son leyes en este sentido, ya que no explican otras cosas. *Podemos llegar a Kepler desde Newton, pero no a la inversa.* Las leyes de Kepler fueron leyes cuando las redactó, ya que en su tiempo no se podían derivar, pero tal vez dejaron de serlo una vez que Newton *las derivó*. Sin embargo, no se trata de una tradición tan rara. Por ejemplo, aunque ahora sabemos que la Ley de la Gravedad de Newton podría derivarse a partir de la Teoría General de la Relatividad de Einstein, seguimos llamándola Ley de Newton.

Como aclaré antes, he elegido este ejemplo porque trata de fenómenos fáciles de visualizar. Repito que lo que hemos visto no es nada común: nadie reúne datos durante cuarenta años antes de redactar un trabajo (no si aspira a tener un empleo seguro o financiación); algo tan grande como nuestro sistema solar sólo aparece una vez en la historia de la humanidad como asunto virgen para el estudio; y nadie desde Newton ha aportado sus propias leyes, inventado la matemática necesaria para plantear el problema y después resuelto las correspondientes ecuaciones. Sin embargo, sí que ilustra la globalización con bastante precisión. Kepler era un alemán que trabajaba en el observatorio de Tycho Brahe (1546-1601), un noble danés, e inspirado por el polaco Nicolás Copérnico, mientras que Newton era inglés.

Un ejemplo más reciente que aporta otras ideas tiene que ver con el efecto Raman. Trabajando con un laboratorio muy rudimentario en Calcuta, Chandrasekhara Venkata Raman (1888-1970; premio Nobel en 1930) observó en febrero de 1928 que cuando una luz de frecuencia  $f$  incidía sobre determinados materiales, además de la luz reflejada de la propia frecuencia  $f$  o del mismo color, se obtenía una luz de una frecuencia levemente distinta,  $f'$ . ¿en qué radica la importancia del descubrimiento de Raman? Pues, según la teoría cuántica, si  $f$  y  $f'$  son las frecuencias posibles para la luz emitida por un átomo o una molécula, también lo es  $f' - f$ . Mientras que la radiación a grandes frecuencias  $f$  y  $f'$  se detecta fácilmente, la radiación a la frecuencia diferencial  $f' - f$  (que puede ser muy pequeña) no es tan fácil de detectar. *Pero sí puede ser inferida desde  $f'$  y  $f$ , lo cual aporta una valiosa información sobre la estructura de la molécula.* Hagamos una analogía. Supongamos que tengo que pesar a un bebé. En lugar de poner sobre la balanza al niño (tras una gran resistencia por su parte), me subo yo en la balanza, me peso, cojo al niño y me peso de nuevo, y a partir de la diferencia entre ambos pesos calculo el del niño.

La enorme importancia de este descubrimiento quedó patente al hacer merecedor a Raman del premio Nobel en el plazo increíblemente corto de dos años (algunos han tenido que esperar décadas para recibir esa llamada a primera hora de la mañana desde Estocolmo, y otros ni siquiera la han recibido).

El efecto Raman se describió para expresar este importantísimo concepto que ahora todos damos por sentado: *las leyes de la naturaleza no varían en el tiempo ni el espacio.*

Así que el efecto Raman, observado por primera vez en Calcuta, se puede ver y verificar con la misma facilidad en Pasadena. Se vio en 1928, pero también se puede ver y explotar hoy en día. Las leyes de Newton son tan válidas hoy como lo fueron entonces, y seguirán gobernando el movimiento de los planetas durante toda la eternidad. Si se descubre un nuevo planeta, el tamaño y el periodo de tiempo de su órbita tendrán el mismo valor de  $T^2/R^3$  que para la Tierra. La velocidad más rápida para todos los cuerpos es la de la luz. Este límite de velocidad es universal, y no sólo se verifica en todos los países, sino en todo el universo. Es la constancia de las leyes de la naturaleza a lo largo y ancho del espacio y el tiempo lo que nos ha permitido a los humanos, que llevamos muy poco tiempo cósmico habitando una parte muy pequeña del universo, hacer predicciones aplicables en todo lugar y en todo momento (incluso inmediatamente después del *big bang*). La constancia de las leyes naturales en el

espacio y el tiempo (de gran ayuda para nosotros), a pesar de ser una idea con un inmenso respaldo empírico, no es una necesidad lógica.

Hay otro elemento más a nuestro favor. El hecho de que las leyes de la naturaleza sean siempre iguales para todo el universo sólo significa que si tomo un electrón o un protón para formar un átomo de hidrógeno aquí en New Haven, obtendré el mismo átomo que si me llevo ese electrón y ese protón a un laboratorio que esté al otro lado del mundo o a un sistema solar diferente y los combino allí. Con *el mismo* quiero decir que el átomo tendrá exactamente las mismas características en sus reacciones químicas, en las frecuencias de luz que emitirá o absorberá, etcétera. Pero ¿qué pasa si en otro sistema solar construyen un acelerador que crea partículas a partir de energía, tomamos un electrón y un protón producidos por ese acelerador y los convertimos en un átomo de hidrógeno? ¿Sería ese átomo de hidrógeno el mismo que produciríamos utilizando un electrón y un protón de la Tierra? La respuesta es sí: *los protones y los electrones (y otras partículas similares) son los mismos en todo el universo, y al combinarse formarán átomos idénticos en cualquier tiempo y lugar.* Los protones de la Tierra son idénticos a los protones de cualquier otro sitio. No existe la más mínima diferencia entre dos protones en su masa, en su carga o en las fuerzas de interacción entre ellos y otras partículas. Aunque dos gemelos *idénticos* nunca son idénticos y dos coches *idénticos* no corren igual, sí resultan idénticos en sus partículas básicas y en los átomos que éstas forman. Eso se debe a la mecánica cuántica, que no permite variaciones continuas de propiedades. Dos partículas son idénticas o no lo son: no hay zonas grises. Si me traen un electrón *impostor*, cualquier diferencia que exista entre él y el electrón real, por mínima que sea, se detectará con total claridad en un experimento cuántico. Por ejemplo, no obedecerá al principio de exclusión de Pauli, que impide que dos fermiones idénticos (como es el caso de los electrones) ocupen la misma órbita en un átomo. El electrón falso quedará al descubierto al ocupar la misma órbita que un electrón. La mecánica cuántica también nos garantiza que cuando un protón y un electrón se combinan para formar hidrógeno sólo son posibles ciertos niveles determinados de energía, es decir, sólo pueden ser emitidas o absorbidas por el átomo determinadas frecuencias diferenciadas de luz. Estamos tan convencidos de esa uniformidad de los átomos que cuando vemos luz procedente de una galaxia lejana con una longitud de onda que se desvía de la longitud de onda de 21 cm del hidrógeno terrestre, no inferimos que el hidrógeno que con-

tiene es diferente del de aquí, sino que la galaxia se está alejando de nosotros y que ese movimiento provoca el efecto Doppler. Además, utilizamos esa desviación para inferir la velocidad galáctica. Así fue como Edwin Hubble (1889-1953) demostró que el universo se expandía.

Gracias a la universalidad de las leyes y los fenómenos naturales, los físicos de la India, Japón y Polonia deducen las mismas leyes y exploran los mismos fenómenos que los de Groenlandia o Islandia. Eso, naturalmente, fomenta el intercambio de ideas, ya que todos tratamos de resolver el mismo rompecabezas. El hecho de hablar diferentes idiomas es irrelevante, ya que las leyes de la naturaleza están escritas en el lenguaje universal de las matemáticas. Y eso no es todo. El día en que consigamos contactar con extraterrestres también podremos compartir sus descubrimientos en la misma investigación, y el *globo* al que se referirá el término *globalización* no será nuestra Tierra, sino la totalidad del universo cerrado y finito en el que habitamos.

Al manifestarse siempre de la misma manera, la naturaleza actúa también como árbitro definitivo en las disputas científicas sobre la validez de las teorías. Si los experimentos se ponen en contra de uno, perderá, sea quien sea. Pero si se ponen a su favor, es seguro que ganará.

La afirmación anterior es cierta a largo plazo, pero no siempre a corto plazo. La autoridad académica y el prestigio pueden enturbiar las cosas temporalmente. Un ejemplo bien conocido es el del astrofísico Subramanian Chandrasekhar (1910-1995; premio Nobel en 1983), sobrino del C.V. Raman del que hablábamos antes. Cuando aún era un joven estudiante de doctorado en Cambridge, Chandrasekhar dedujo que ciertos tipos de estrellas llamadas *enanas blancas* no podían superar unas 1,44 masas solares (el límite de Chandrasekhar). En caso contrario, se colapsarían debido a la atracción de la gravedad. El concepto del colapso de una estrella que superase el límite de Chandrasekhar fue un precursor del concepto de los agujeros negros.

Cuando presentó sus resultados en 1935 ante la Royal Society, sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944), el más célebre astrónomo británico, los objetó violentamente, alegando que Chandrasekhar había hecho un uso erróneo de la mecánica cuántica y que el comportamiento que proponía para una estrella era sencillamente absurdo. Muchos físicos sabían que el argumento de Eddington era incorrecto, pero no salieron en defensa de Chandrasekhar (unos porque lo consideraron una obviedad, y otros por temor a contradecir a Eddington). Chandrasekhar abandonó Inglaterra (que le cerró



FIGURA 4

Subramanian Chandrasekhar, el astrofísico cuyo trabajo fue inicialmente cuestionado por A. S. Eddington. Sin embargo, no sólo lo vio confirmado, sino que recibió el premio Nobel y ha dado nombre al observatorio espacial de rayos X Chandra, lanzado en julio de 1999.



FIGURA 5

Sir Arthur Stanley Eddington.



FIGURA 6

Satyendra Nath Bose.

todas las puertas a raíz del incidente) y se trasladó a Estados Unidos, donde llegó a ser uno de los astrofísicos más respetados e influyentes del mundo. Sus hallazgos fueron aceptados universalmente, y recibió el premio Nobel en 1983, más de cincuenta años después de su genial descubrimiento.

Los teóricos no siempre siguen a los experimentadores en la explicación de las mediciones realizadas. A veces anticipan o predicen un fenómeno (por ejemplo, una nueva partícula) antes de haberlo visto. He elegido dos ejemplos que ilustran la globalización, así como la generosidad.

El primero tiene que ver con la predicción que hizo Einstein en 1915 basándose en su teoría general de la relatividad, que repasaremos brevemente. Recordemos que normalmente no se puede ver un objeto situado tras un obstáculo, ya que la luz del objeto se desplaza en líneas rectas que son bloqueadas por el obstáculo. Supongamos que hay una estrella detrás del Sol. No podremos verla por el motivo de que el Sol es tan brillante que no lograríamos ver la estrella aunque en lugar de estar detrás de él estuviera al lado del Sol. Supongamos que esperamos un eclipse total. Seguiremos pensando que no vamos a ver la estrella que se encuentra detrás. Y es precisamente aquí donde la teoría de Einstein predice que sí que podremos ver algunas estrellas situadas *detrás* del Sol, porque la luz que emiten traza una curva al aproximarse al Sol, y llega hasta nuestros ojos. Al poco tiempo de que Einstein realizase esta predicción estalló la Primera Guerra Mundial, en la cual Inglaterra y Alemania eran enemigas. Aunque Einstein era alemán, su predicción fue confirmada el 29 de mayo de 1919 por una expedición británica enviada a observar un eclipse solar total en una isla situada junto a la costa africana, que estaba dirigida nada menos que por el propio Eddington (el que en la anécdota anterior salía un tanto malparado). Fue un excelente ejemplo de la hermandad entre científicos unidos por un propósito que traspasa incluso las barreras erigidas por naciones en guerra.

El segundo ejemplo empieza con el físico indio Satyendra Nath Bose (1894-1974), quien trataba de comprender cómo unas partículas de luz llamadas *fotones* compartían entre sí la totalidad de su energía cuando estaban atrapadas en un recipiente. A diferencia de los electrones, que son fermiones y obedecen al principio de exclusión, los fotones son bosones, que no sólo no se resisten a hacer lo que hacen otros bosones, sino que tienden a imitarse entre sí y hacer lo mismo que los demás bosones. Usando métodos estadísticos que tomaban en cuenta todo eso, Bose encontró la respuesta en 1920, y se la envió a Einstein, preguntándole si

podría ayudarle a publicar su estudio. Einstein se dio cuenta del mérito del trabajo, lo tradujo y lo hizo publicar. Unos años después Einstein descubrió que el método de Bose no sólo era aplicable a los fotones, sino también a muchos otros bosones, como los átomos de  $\text{He}^4$  (por supuesto, los bosones deben su nombre a nuestro protagonista). Einstein también se dio cuenta de que por debajo de cierta temperatura un grupo de bosones se condensaría: una fracción finita de bosones en el recipiente se hallarían en el mismo estado cuántico, produciendo efectos sorprendentes. Esta predicción de la condensación Bose-Einstein fue confirmada definitivamente unos ochenta años más tarde por dos norteamericanos, Eric Cornell y Carl Weiman, y un alemán, Wolfgang Ketterle, quienes compartieron el premio Nobel en 2001.

Tras esta introducción, algo extensa, a nuestra profesión, dedicaré el resto del artículo a la cuestión de las comunicaciones en los últimos tiempos.

No debería sorprendernos que los medios empleados por los físicos para comunicarse entre sí hayan evolucionado a lo largo de los siglos. En los tiempos de Copérnico, Newton o Galileo, años de trabajo se reunían en enormes volúmenes que publicaba el propio autor, una sociedad científica o algún rico mecenas. Copérnico publicó sus trabajos en seis volúmenes bajo el título de *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*, Newton escribió sus *Principia* y Galileo (1654-1642), su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*.

Este ritmo pausado dejaba de ser el adecuado a medida que pasaba el tiempo y el volumen de conocimientos crecía exponencialmente. Como dice el proverbio, cuanto mayor es la esfera de conocimiento, mayor es su contacto con las zonas de oscuridad. Hemos visto que en tiempos de Einstein o Bose la comunicación se realizaba a través de publicaciones periódicas. En una época de avances en vertiginosa evolución, la publicación era la pauta que establecía las prioridades del autor.

Podría pensarse que, siendo la naturaleza un árbitro justo que ofrece igualdad de oportunidades a todos los físicos, el mundo de las publicaciones sería también un terreno igualitario. Pero hace tan sólo unas décadas no lo era en absoluto, debido a un problema que empieza a afectar gravemente a los países del Tercer Mundo. Ahora me gustaría describir ese problema y explicar detalladamente una solución maravillosa al mismo, basada en Internet.

Para ser conscientes del problema, así como de la innovación que lo resolvería, hay que entender cómo trabajaban los físicos durante la posguerra. Normalmente alguien realizaba un experimento que daba resultados interesantes o inesperados. Por ejemplo,



en el caso de la superconductividad nos encontramos con que al enfriar un cable la resistencia eléctrica iba disminuyendo gradualmente hasta que, de repente, llegaba a cero (¡lo que significaba que podía haber flujo de corriente sin un voltaje que la impulsara!). Este resultado se envió a una revista, fue analizado por expertos y, finalmente, fue publicado. A continuación se reproduciría en otros laboratorios. Mientras tanto, se elaboraron teorías diversas para explicar lo que sucedía en el cable. Cada nueva conjetura se enviaba a una revista, era examinada y, por fin, se publicaba. A veces la respuesta al objeto de una investigación llegaba de una vez y de una sola fuente, y en otros casos (como el de la superconductividad) pasaron varias décadas antes de que todo empezara a encajar, y trabajaron en ella múltiples autores, teóricos y experimentales, dispersos por todo el mundo.

Fue en este proceso del avance iterativo e interactivo en el que los científicos del Tercer Mundo empezaron a sentirse en seria desventaja a medida que el ritmo de las investigaciones se aceleraba, a principios de la década de los sesenta. En primer lugar, los números de las revistas les llegaban con meses de retraso respecto a su publicación, y además tenían que compartirlos con el resto de los usuarios de la biblioteca. Si tenían una respuesta inteligente a algo que se hubiera publicado, podían enviarla a una revista. Su examen por parte de los expertos (con todas sus idas y venidas) se prolongaba durante meses, ya que se llevaba a cabo por correo postal. Por fin, la revista aceptaba el artículo, pero el autor tenía que rezar para que ninguno de sus colegas occidentales hubiera tenido la misma idea en los meses transcurridos. Las cosas se pusieron aun peor hace unas décadas, cuando se implantó en Occidente la costumbre de enviar ediciones preliminares. Se trataba de versiones de los trabajos previas al examen de los expertos que los autores hacían llegar a un círculo de elegidos. Si uno no pertenecía a ese club, no estaba al tanto de esa información, y tenía que esperar a que apareciera en las revistas, mientras que en el club tenían acceso a datos o ideas teóricas posiblemente valiosos. Aun estando en el club, si uno vivía en el Tercer Mundo, la edición preliminar tardaría bastante tiempo en llegar por barco. Si uno enviaba sus propias versiones preliminares (en lo que parecía papel higiénico reciclado), éstas no gozaban de la misma autoridad que los atractivos y muy aparentes ejemplares de imprenta o impresora láser de los colegas occidentales.

Hasta aquí el problema. Ahora, la solución.

Nuestra historia tiene dos partes: una muy conocida por el público en general y otra que es el objeto de este ensayo.

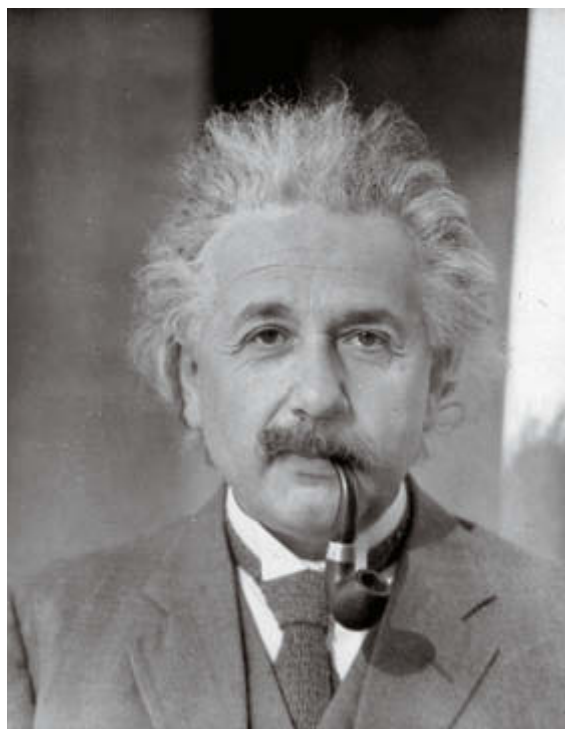


FIGURA 7

Albert Einstein.

El protagonista de la primera parte es Tim Berners-Lee, quien trabajó en la CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear. En la CERN se encuentra actualmente el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), y durante décadas ha sido el núcleo de la colaboración internacional en proyectos de física de partículas elementales mediante el uso de grandes aceleradores o colisionadores. En ellos participan equipos de más de mil miembros. A Berners-Lee se le ocurrió la idea de crear una red en la que los miembros pudieran compartir resultados y datos. La primera red se inauguró el 6 de agosto de 1991. Berners-Lee se limitó a ceder de forma gratuita el protocolo básico, y ya sabemos todos cómo ha ido evolucionando esta red hasta dominar actualmente muchos aspectos de nuestras vidas. Voy a hablar de la parte que toca a los físicos.

En 1991 Paul Ginsparg, un seguidor de la teoría de cuerdas que trabajaba en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, desarrolló una red (llamada xxx.lanl.gov) en la que los autores podían cargar sus artículos. El sistema funciona así: si uno quiere publicar un resultado en los archivos, sube su artículo a la red del laboratorio (hay una historia dentro de la historia en este proceso de subir artículos de la que forma parte lo que llamamos  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ; volveré sobre ello dentro de un momento). La red mantiene registros de cada artículo que llega. Al día siguiente se podrá leer en todo el mundo un extracto del mismo, junto con los de otros artículos enviados en las últimas 24 horas. Si alguien está interesado, puede hacer clic en otro



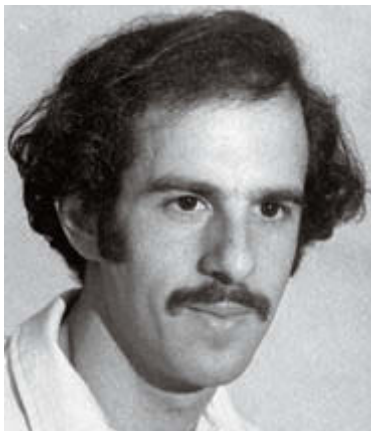


FIGURA 8

Paul Ginsparg dio más velocidad a la comunicación entre científicos.

botón y leer el artículo completo, que se podrá mover, leer, imprimir y archivar. El autor es libre de enviar el artículo a una revista y, cuando se publique, anunciarlo en la red de Ginsparg. Así ha sido durante las dos últimas décadas. Ginsparg desarrolló él solo todo el programa, sin ninguna financiación, en su tiempo libre. Si la idea fue digna de un visionario, no menos brillantes fueron su ejecución y la puesta en marcha de una maquinaria que no ha fallado nunca (que yo sepa). Por supuesto, en la actualidad Ginsparg dirige proyectos de mayor envergadura en Cornell, donde cuenta con todo el apoyo que merece. La página se llama ahora <http://axiv.org>, y contiene artículos de muchas subdisciplinas.

Basta con tener acceso a Internet para poder buscar en el archivo electrónico y encontrar cualquier artículo cargado desde 1991. Desde cualquiera de estos artículos podemos seguir la pista hasta otro con la misma facilidad. Para los académicos que antes dedicaban horas a escudriñar mohosos volúmenes en las bibliotecas eso supone una ayuda increíble. Ya no existe el problema de que falte un volumen, o de que esté usándolo otro colega, o de que lo haya tomado prestado indefinidamente el director del departamento, ni tampoco el de buscar una revista a la que no está suscrita la institución en la que uno trabaja, o el de no saber en qué revista se publicó el artículo. No existe el riesgo de publicar un artículo y descubrir después que se han publicado los mismos resultados en una revista que uno no lee, o que ni siquiera conocía. Del mismo modo, se podía demostrar que uno desconocía que alguien se había anticipado a su último trabajo. Hoy en día sólo queda un reducidísimo grupo de físicos en rápida recesión que no lee los artículos archivados en esta red.

El sistema de Ginsparg es un gran equiparador. Pensemos en un físico del Tercer Mundo. Ya no tiene que esperar cuatro o seis meses hasta conseguir una copia de los nuevos artículos que se publican. Si tiene una respuesta inteligente a alguno de ellos, no tiene por qué esperar otros seis meses (o incluso más, si los expertos plantean preguntas) a que se publique su respuesta. Esa extenuante espera de casi un año (que en el vertiginoso ritmo de vida actual sería catastrófica) queda completamente eliminada en la versión electrónica. El *círculo íntimo* de las ediciones preliminares ya no existe, y eso no sólo vale para el Tercer Mundo, sino para cualquier club de carácter excluyente. En cuanto a la apariencia física del artículo, las cosas han cambiado por completo. El artículo de Occidente lo imprime el usuario del Tercer Mundo con papel del Tercer Mundo en una impresora del Tercer Mundo, y a la inversa. Algunas de estas últimas consideraciones también podrían aplicarse a físicos que trabajan

en universidades occidentales poco conocidas. En el archivo electrónico, el que vemos en la pantalla del ordenador, todos los artículos tienen el mismo aspecto. Todos han recibido el mismo tratamiento, y todos tardan el mismo tiempo en salir a la luz, es decir, menos de un día. En otros tiempos había que elegir entre pagar un alto precio o aceptar que la publicación del artículo que uno había escrito se retrasara aun más. Publicar en la red no cuesta nada. Tampoco existe el peligro de que un experto de la revista le robe a uno las ideas mientras bloquea la publicación del artículo.

Ahora vamos con la historia dentro de la historia. La idea de Ginsparg de un archivo mundial donde todos pudieran colocar sus artículos en condiciones de igualdad se topó con un serio inconveniente, consecuencia del hecho de que los artículos sobre física suelen estar repletos de caracteres extraños y complicadas expresiones matemáticas. Evidentemente, se necesitaba algún tipo de *software* para producir esas fórmulas. Y aquí es donde surge el problema.

Consideremos la ecuación (5) de este artículo — $T^2/R^3 = (4\pi^2/GM)$ —, que yo he escrito usando Microsoft Word porque el resto del artículo era más fácil de componer en Word. Supongamos que esa ecuación forma parte de un artículo que quiero subir al archivo. Si lo hago en formato Word, tengo que asegurarme de que todos mis lectores puedan verlo. ¿Y si no tienen esta versión de Word? ¿Y si utilizo un exótico *software* matemático diseñado para ecuaciones que contengan fuentes exóticas? Las ecuaciones pueden verse a la perfección en mi ordenador, porque tiene el *software* necesario, pero resultarán ilegibles para los lectores que no tengan ese programa. Aquí fue donde Ginsparg recurrió al brillante sistema inventado por Donald Knuth, profesor de Ciencias de la Computación en la Universidad de Stanford. Knuth inventó un programa, llamado  $\text{T}_E\text{X}$ , en el que la producción de artículos se divide en dos fases. Durante la primera se escribe lo que se denomina un archivo en bruto (*raw file*) empleando sólo caracteres ASCII, que son los más básicos (esencialmente el alfabeto, los números y algunos otros) y se pueden crear hasta en el más primitivo de los ordenadores. No hay ningún problema, hasta que aparece la primera fórmula. Supongamos que la fórmula es la ecuación (5) que ya conocemos. Ahora hay que insertar las siguientes líneas:

```
\begin{equation}
\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM}
\end{equation}
```

(el lector no debe preocuparse si las líneas parecen no tener ningún sentido: más tarde las voy a decodificar). Volvemos al texto normal e insertamos

otra ecuación cada vez que sea necesario, dando al ordenador instrucciones igualmente crípticas, y así hasta el final. Pero ahora llega la segunda parte. Descargamos el programa  $T_{\text{E}}X$  (que es gratuito). Cuando lo ejecutamos, nos pide el archivo ASCII en bruto. Luego produce un archivo PostScript o PDF en el que aparecen milagrosamente las ecuaciones tal y como las vemos aquí:

$$G_{\mu\nu} = 16\pi T_{\mu\nu} \quad (6)$$

A esto se le llama *texear* el archivo. El programa  $T_{\text{E}}X$  contiene todas las fuentes que se necesitan para todas las expresiones y todos los caracteres matemáticos. Puede escribir fracciones y fracciones dentro de fracciones. Se encarga de poner negritas, numerar ecuaciones y todo eso.

Si queremos enviarlo a otra persona o subirlo al archivo, podemos usar la versión *texeada* en PDF (algo muy sencillo gracias a los enormes anchos de banda actuales) o sólo el fichero ASCII (lo más común en otros tiempos), que se puede descargar y *texear* en el ordenador de destino usando el programa gratuito  $T_{\text{E}}X$ .

Ahora sería divertido preguntarnos cómo conoce el ordenador nuestras intenciones respecto a la ecuación (5). Desde la serie de líneas que empiezan por `\begin{equation}` él ya sabe que comenzamos una ecuación. La siguiente línea con `\frac` le dice que queremos una fracción. Todo comando de fracción va seguido de dos llaves cerradas `{...}` y `{...}` que contienen el numerador y el denominador respectivamente. Observen que `\pi` significa  $\pi$ . El lado izquierdo es más complicado. La línea `\end{equation}` nos dice que volvemos a texto normal.

Es cierto que si alguien quiere jugar a esto, tiene que aprender  $T_{\text{E}}X$ . Pero es bastante intuitivo, y la mayoría lo domina en unos días. Es muy importante saber que lo controlamos nosotros, a diferencia del *software* o el ancho de banda. Además, es un lenguaje muy útil para emplearlo cuando se quiere describir alguna ecuación en un correo electrónico. Por ejemplo, podemos escribirle a un amigo *Supongamos  $G_{\mu\nu} = 16\pi T_{\mu\nu}$* ... y el lector sabrá qué queremos decirle

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad (7)$$

Por último, también es muy sencillo insertar gráficos o tablas en  $T_{\text{E}}X$ .

Paul Ginsparg fue galardonado con un premio MacArthur en 2001. La revolución que empezó en una pequeña parcela de la física de partículas se ha extendido a muchas disciplinas hermanas. Como la red no está arbitrada (aunque existe cierta vigilancia para evitar artículos perjudiciales), uno puede publicar lo que quiera. Pero no hay que olvidar que si alguien mete la pata con demasiada frecuencia, habrá perdido la credibilidad cuando la necesite de verdad. Es habitual enviar los artículos del archivo a revistas arbitradas por expertos para recabar opiniones de prestigio y darle así reputación al proyecto. Los retrasos en este proceso no son tan perniciosos como antes, ya que el trabajo está ya ahí fuera.

Quiero concluir con otra revolución de Internet que se utiliza en las ciencias de la educación a un nivel inferior. Se trata de cursos completos que ya están disponibles en la web. Tuve la oportunidad de participar en un experimento semejante hará un par de años. Si van a <http://oyc.yale.edu/physics>, podrán acceder a las clases de introducción a la Física que impartí en el otoño de 2006 (Yale pagó los costes de producción mediante una beca de la Fundación Hewlett). Podrán acceder a las clases (en vídeo y audio), a la transcripción del audio, a series de problemas, a sus soluciones, a exámenes y a sus soluciones. Todo completamente gratuito y accesible desde cualquier punto del planeta. Sé que muchas instituciones de todo el mundo las están utilizando como base para cursos, y que hay estudiantes de universidades de Estados Unidos y otros países que las utilizan para estudiar y complementar sus clases normales. Por supuesto que no es el único curso de Yale al que se puede acceder, y Yale no es la única institución que comparte sus recursos de este modo. Muchas instituciones de todo el mundo lo han hecho ya. Hace muchos años, cuando era alumno de Ingeniería en la India y estudiaba Física, me habría encantado tener acceso a este tipo de material. Estoy contento de que las generaciones actuales tengan más facilidades para acceder a esta información.

Así termina mi ensayo, con su idiosincrásica elección de temas, ejemplos y personajes cuyas vidas se entrecruzaron de una forma curiosa. Raman era tío de Chandrasekhar; Eddington atacó a Chandrasekhar sin razón, pero tuvo el valor de corroborar la teoría de Einstein; Einstein ayudó a Bose a publicar su trabajo, y lo dio a conocer; y Cornell, Ketterle y Wieman demostraron la condensación Bose-Einstein.

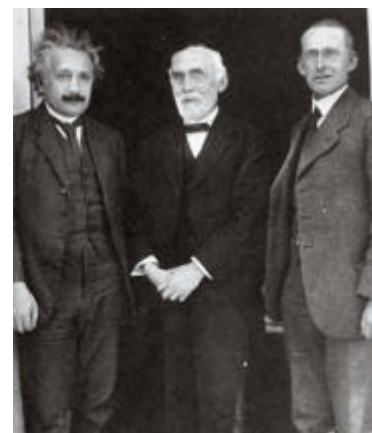


FIGURA 9

Einstein, Lorentz y Eddington.

#### AGRADECIMIENTOS

Aprovecho esta oportunidad para dar las gracias a Nayan Chanda, director del departamento de publicaciones y editor del Yale Global Online Magazine en el Yale Center for the Study of Globalization, por invitarme hace unos años a escribir un artículo para el Yale Global que ha sido el punto de partida para este ensayo.

HONG HAO

MY THINGS ABOUT CIRCLES NO. 3. 2006