

¿V < C EN 1820?

Alberto Clemente de la Torre

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Mar del Plata, Funes 3350, 7600 Mar del Plata.

Una paradoja de simple solución, que involucra fuerzas de origen electrostático y magnetostático, es planteada y resuelta. Dicha solución es posible solamente si $V^2 < 1/\epsilon_0\mu_0$ sugiriendo que, ya en 1820, se hubiera podido encontrar una cota superior a la velocidad.

El propósito de esta nota es exponer una paradoja simple cuya solución permite presentar didácticamente en una temprana etapa del aprendizaje de la física, un hecho de fundamental importancia: el límite absoluto para las velocidades. Se plantea además al historiador la cuestión de la posibilidad de su descubrimiento en 1820.

En 1820, Ampère publicó la evidencia experimental, que dos conductores paralelos con corrientes en el mismo sentido, se atraen mutuamente como consecuencia de fuerzas de origen magnético. A fin de presentar una aparente contradicción, podemos suponer un modelo para las corrientes mencionadas, que consiste en dos líneas largas con carga positiva uniforme que se desplazan longitudinalmente con velocidad constante v , (por ejemplo, dos haces paralelos de protones). Un observador en reposo detecta el efecto atractivo descubierto por Ampère. Ahora bien, si suponemos otro observador que se desplace con la misma velocidad, éste observará dos líneas cargadas positivas en reposo, debiendo ser su interacción repulsiva en vez de atractiva. Una paradoja es un razonamiento aparentemente correcto que lleva a una conclusión evidentemente falsa. Resolver la paradoja es encontrar la falla en el razonamiento. En este caso, la conclusión del segundo observador es evidentemente correcta ya que ésta se basa en la ley de Coulomb. La falla reside en que no hemos considerado la totalidad de las fuerzas presentes para el primer observador. Además de la fuerza magnética atractiva, puesta en evidencia en el experimento de Ampère, se debe considerar también a la fuerza de repulsión eléctrica. Teniendo en cuenta el balance de ambas fuerzas, la interacción resulta repulsiva para ambos observadores y la paradoja desaparece. Veremos a continuación que para que esto suceda, la velocidad de las cargas no puede exceder cierto valor, que coincide con la velocidad de la luz. De lo contrario, la simple paradoja se transforma en un serio problema para la física. Designemos con d a la distancia que separa las líneas con densidad lineal de carga λ , y corriente $I=\lambda v$. Es un ejercicio

elemental calcular las fuerzas magnética (atractiva) y eléctrica (repulsiva) por unidad de longitud para el primer observador.

$$\frac{F_{mg}}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\lambda^2 v^2}{d} ; \quad \frac{F_{el}}{l} = -\frac{2\lambda^2}{4\pi\epsilon_0 d}$$

La fuerza total por unidad de longitud será entonces:

$$\frac{F}{l} = \frac{F_{el}}{l} + \frac{F_{mg}}{l} = \frac{\mu_0 \lambda^2}{2\pi d} \left(v^2 - \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \right)$$

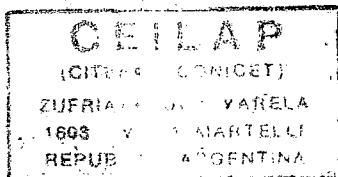
Esta expresión resulta negativa; o sea indica repulsión, en acuerdo con el segundo observador; solamente si no se permite a la velocidad exceder cierto valor. La electrostática y magnetostática son coherentes para ambos observadores si existe un límite absoluto para las velocidades. El acuerdo entre éstos es cualitativo, esto es, repulsivo para ambos. Hoy sabemos que un análisis cuantitativo debería incluir efectos relativistas (desconocidos en 1820) en la longitud l y en la densidad de carga λ provenientes de la contracción de Lorentz. ¿Qué sucede si el sistema se encuentra, no en el vacío, sino en un medio de permitividad y permeabilidad ϵ y μ . En este caso debemos reemplazar estos valores en lugar de los valores correspondientes al vacío, y se presenta la posibilidad problemática de un cambio de signo en la fuerza, ya que pueden existir velocidades v mayores que la de la luz en el medio. Sin entrar en un análisis cuantitativo, es posible presentar argumentos que indican que no habrá necesariamente contradicción. Cuando una partícula o línea cargada, se mueve a velocidad mayor que la de la luz en un medio, ésta irradia energía conocida con el nombre de "radiación de Cerenkov". La energía asociada a dicha radiación debe provenir de la energía cinética de las cargas y como consecuencia, la velocidad de las mismas no puede ser constante. El sistema de referencia donde las cargas están en reposo no es un sistema inercial

en este caso, y en consecuencia deberíamos considerar, además de la fuerza eléctrica repulsiva, fuerzas virtuales características en los sistemas no inerciales. Sin entrar en detalles se puede estimar que la radiación de Cerenkow implica una repulsión entre las líneas cargadas porque, en la región entre ambas corrientes, la densidad de energía es mayor. Un incremento de la distancia entre las líneas reduce la energía total del sistema. Este efecto contribuye en el sentido correcto para evitar la paradoja.

Es un hecho conocido que la electrodinámica clásica es una teoría relativista y por lo tanto debe contener la imposibilidad de velocidades mayores que la de la luz. Esto surge de las ecuaciones de Maxwell. Lo que es notorio aquí, es que dicho límite puede encontrarse en los campos estáticos sin invocar ondas electromagnéticas, esto es, en

una teoría aún incompleta, sin los aportes hechos por Faraday y Maxwell. ¿Hubiera podido Ampere adelantarse en 45 años a Maxwell al relacionar $\epsilon_0\mu_0$ con la velocidad de la luz, y en 85 años a Einstein al establecer $v \leq c$. Para hacerlo se podría haber empleado el argumento presentado aquí. Sin embargo, este argumento, que es para nosotros muy sencillo, casi trivial, podría ser muy abstracto en 1820. Hoy todo estudiante está acostumbrado a argumentos que involucran gedankenexperimente con resultados invariantes en diferentes sistemas de referencia. Esta forma de argumentar no estaba establecida en 1820 y no debe extrañarnos que, a pesar de existir la posibilidad lógica de deducir $v \leq c$ en 1820, esto no haya ocurrido.

Se agradece a H. Martín y a R. Zamorano por su participación en discusiones.



Recibido 05/06/96