

磁力只是幻象？

陳其威^{1*} 邱薇如²

¹ 國立臺東高級中學

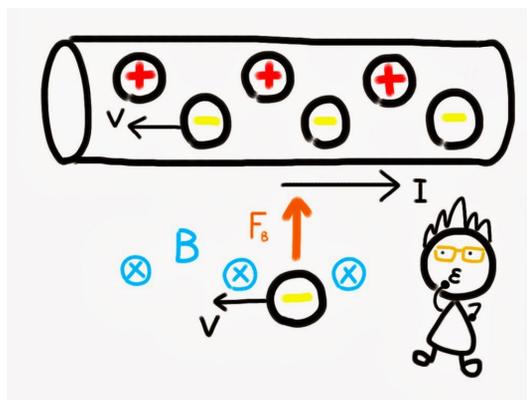
² 國立鳳山高級中學

電磁學是一門令人又愛又恨的科學，和我們的生活息息相關，但又令人難以捉摸，在中學階段的電磁學課程中介紹到，電流(電荷的運動)可以產生磁場，而變動的磁場也可以產生電，兩者相輔相成，密不可分。到了大學的電磁學課程中，大多以數學形式描述電磁學，今天我們先捨棄困難的數學，從定性上來看一個有趣的問題。

首先，我們參考第一張圖，在一條通有電流的長直導線內，其中有正負電，正電(原子核)靜止，而負電(電子)向左運動，產生向右的電流。而在導線外，我們安排另一個電子也向左運動(速度相同)，最後，由導線外處於靜止座標的靜止觀察者，來觀測這個物理現象。

由於導線內的電流向右，利用安培右手定則，通電的長直導線會在導線周圍，產生以導線為圓心的同心圓磁場，而在導線的下方，磁場方向是射入紙面，以 $B \otimes \otimes \otimes$ 表示。而導線外的電子，向左運動，產生向右的電流，可利用右手開掌定則判斷出電子受力的方向，所以靜止觀察者看見這個導線外的電

受到向上的磁力(勞倫茲力)，以 $F_B \uparrow$ 表示(為了承接以下的問題，我們假設導線內外的負電速度相同)。

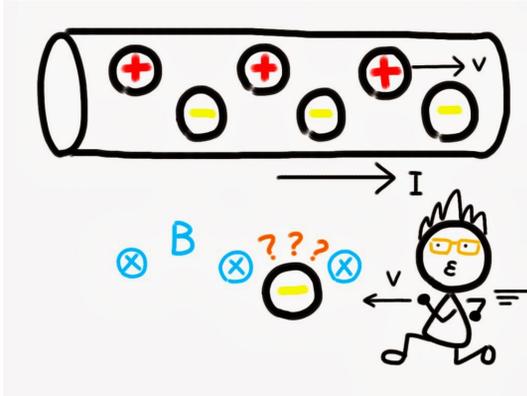


靜止時，觀察者看到電子受磁力向上

接下來，我們來思考一個有趣的問題，如果當觀察者與電子一起運動時(速度相同)，他會看到什麼情況？運動中的觀察者看到導線內外電子與自己皆相對靜止，而正電荷反而向右運動，所以導線中電流的方向依然向右，產生的磁場不變。但觀察者看到導線外這顆電子沒有運動，以至於所受的磁力等於零。

這樣解釋的結果顯示電子受力與觀察者間的相對運動有關，實際上真的是這樣嗎？電子真的就沒受到磁力了嗎？這到底該如何解釋？問題出在哪？

*為本文通訊作者



當觀察者開始運動，電子還有受到磁力嗎？

的確，運動的觀察者看這顆導線外電子是靜止的，而使人誤以為電子沒受到磁力。但是事實上電子還是有受到磁力的。那到底應該如何來解釋呢？其實，關鍵就在於觀測者在運動時，他所看到正電的電荷線密度會增加（長度收縮），而負電的電荷線密度會比原先小，這樣一點點的差值，會讓觀測者認為導線從原本的電中性，變成帶一點點的正電，所以觀測者仍會覺得導線產生向右的電流，結果使得導線外的電子仍受到庫倫吸引力，而且和原磁力方向相同！

大家是不是感覺很酷呢？解釋到這邊，一定還有人想問，既然隨導線外電子一起運動的觀察者所觀察到導線外電子受到的庫倫力和原來磁力的方向相同，那這兩個不同座標系所觀察到的力，其大小是否一樣呢？

由數學式推導後發現，發現前後磁力會差了 γ (gamma) 係數倍。也就是說，電子所受磁力(勞倫茲力)真的會隨著觀測者的運動而有不同的結果。但是要特別聲明

的是，當觀測者速度遠小於光速時，其實這個差值是小到可以忽略，所以在高中課程中，也不會特別強調觀測者是否有在運動，以免讓學生混淆，不過從這個現象可以得知，當物體運動接近光速時，似乎一切的一切都變得不再一樣了呢！

最後，從數學的角度來描述這個問題的答案：

靜止觀察者：導線中電流大小

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\lambda \Delta x}{\Delta t} = \lambda v, \text{ 其中 } \lambda = \lambda_+ = \lambda_-,$$

導線在距離 d 的電子產生的磁場

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} = \frac{\mu_0 \lambda v}{2\pi d},$$

$$\text{因此電子所受的磁力 } F_B = evB = \frac{\mu_0 e \lambda v^2}{2\pi d}$$

其中 e 是電子電量。

運動的觀察者：

由於電子是靜止的，因此沒有速度也不受磁力 $F_B = 0$ ，而導線在運動時的長度會比較短，因此正電荷線密度會

$$\text{增加 } \lambda'_+ = \frac{\lambda}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

而負電荷的線密度會比原本的小（因為原本是在運動） $\lambda'_- = \sqrt{1-v^2/c^2} \lambda$ 可以得到導線的線密度為

$$\begin{aligned} \lambda'_{total} &= \lambda'_+ - \lambda'_- \\ &= \frac{\lambda}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \lambda \sqrt{1-v^2/c^2} \\ &= \frac{\lambda}{\sqrt{1-v^2/c^2}} [1 - (1-v^2/c^2)] \end{aligned}$$

$$= \frac{\lambda}{\sqrt{1-v^2/c^2}} (v^2/c^2)$$

$$= \lambda\gamma(v^2/c^2)$$

可得導線外負電受庫侖靜電力

$$F_e = eE = e \frac{\lambda_{total}}{2\pi\epsilon_0 d}$$

$$= \gamma \frac{e\lambda v^2}{2\pi\epsilon_0 d c^2} = \gamma \frac{\mu_0 e\lambda v^2}{2\pi d} = \gamma F_B$$

其中 $c^2 = \frac{1}{\mu_0\epsilon_0}$ ，而 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

當速度遠小於光速時，可以忽略。

而當速度接近光速時，本身外力就要做相對論修正，完全滿足羅倫茲轉換，如此簡而美的物理，真是讓人不禁讚嘆物理的奇妙！

參考文獻：

Ampere law HH0122-Ampere from <http://hsiuha.wikispaces.com/>.

維基百科-勞倫茲力 取自 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B4%9B%E4%BC%A6%E5%85%B9%E5%8A%9B>。

維基百科-狹義相對論 取自 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%8B%AD%E4%B9%89%E7%9B%B8%E5%AF%B9%E8%AE%BA>