

動量守恆與牛頓第三定律

中學物理課本多以牛頓第三定律去證明動量守恆(conservation of momentum)定律，方法如下：

假設一封閉系統，內有三個物體 A、B 和 C (再簡單一些，考慮二個物體也可以)。

此系統不受任何外力作用，所以，要考慮的力只是它們互相之間的作用力。

我們用 \vec{F}_{AB} 代表物體 A 作用於物體 B 的力，餘此類推。

應用牛頓第二定律於物體 A

$$\vec{F}_{BA} + \vec{F}_{CA} = \frac{d}{dt}(m_A \vec{v}_A) \dots\dots\dots(1)$$

應用牛頓第二定律於物體 B

$$\vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CB} = \frac{d}{dt}(m_B \vec{v}_B) \dots\dots\dots(2)$$

應用牛頓第二定律於物體 C

$$\vec{F}_{BC} + \vec{F}_{AC} = \frac{d}{dt}(m_C \vec{v}_C) \dots\dots\dots(3)$$

公式 (1) + (2) + (3)

$$(\vec{F}_{BA} + \vec{F}_{AB}) + (\vec{F}_{AC} + \vec{F}_{CA}) + (\vec{F}_{BC} + \vec{F}_{CB}) = \frac{d}{dt}(m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B + m_C \vec{v}_C) \dots(4)$$

根據牛頓第三定律，A 作用於 B 的力是與 B 作用於 A 的力的量值(magnitude) 相同、方向 (direction) 相反。所以，式(4) 左邊的每一個括號內的兩個力抵消。 所以，

$$m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B + m_C \vec{v}_C = \text{常矢量(constant vector)}$$

將討論擴展至 n 個物體，此為動量守恆定律。

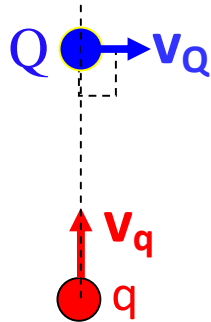
但以上只證明若牛頓第三定律成立，動量守恆定律也必然成立。問題是牛頓第三定律真是牢不可破嗎？

答案是：『不是』。

下頁舉出一個例子。

一個著名的牛頓第三定律不成立例子：

考慮右圖



圖中 q 和 Q 是兩粒如箭矢所示方向走動著的**正電荷**。假設它們的速度遠低於光速，所以不須考慮相對論效應。

q 與 Q 之間存在**電磁相互作用 (EM interaction)**。首先，它們之間的庫倫電力符合作用力與反作用力的關係。

$$q \text{ 施於 } Q \text{ 的電力} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$
$$Q \text{ 施於 } q \text{ 的電力} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

其次，我們要討論的它們之間的磁作用。

Q 作用於 q 的磁力

有！

但是，

q 作用於 Q 的磁力

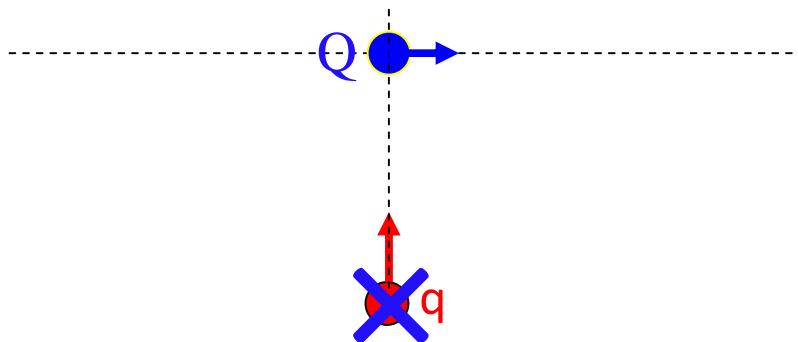
沒有！

磁力 (magnetic force) 是如何發生？譬如以 Q 為例，

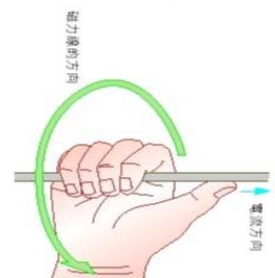
1. Q 是移動中的電荷，它在它的周圍產生磁場。情況如通電流的電線周圍產生磁場 ($B = \mu_0 I / 2\pi r$)。
2. q 是處於由 Q 產生的磁場中，所以 q 受到磁力作用。
($F = qvB$)

✿ Q 作用於 q 的磁力 ✿

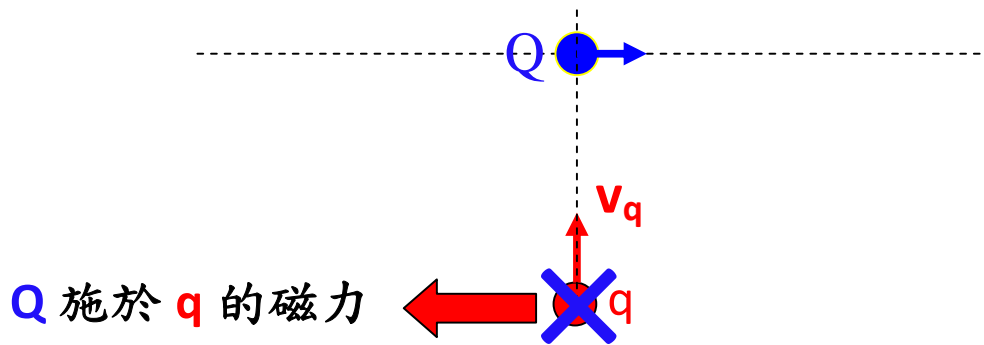
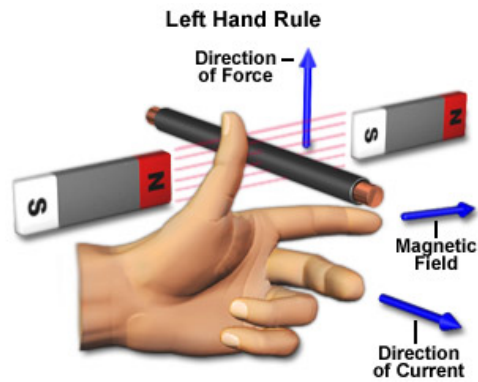
Q 在 q 的地方產生一垂直於圖平面向入的磁場（想像一如 Q 走動方向相同的電流所產生的磁場）。



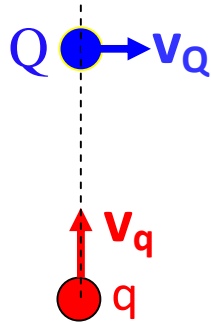
由 Q 產生的磁場



q 的電荷與 Q 在該處的磁場發生作用，令 q 受磁力作用。此磁力的方向是向左（左手定則）。



✿ **q** 作用於 **Q** 的磁力 ✿

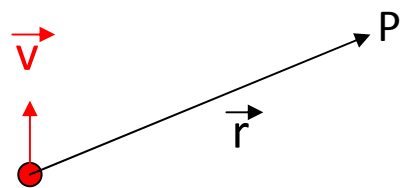


q 在 Q 的地方沒有產生磁場，所以 q 作用於 Q 的磁力是零。

為甚麼 q 在 Q 的地方沒有產生磁場？

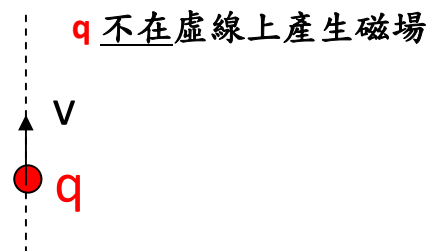
(1) 電荷 q 以 v 行走，在點 P 產生的磁場公式是

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \frac{\vec{v} \times \vec{r}}{r^3}$$



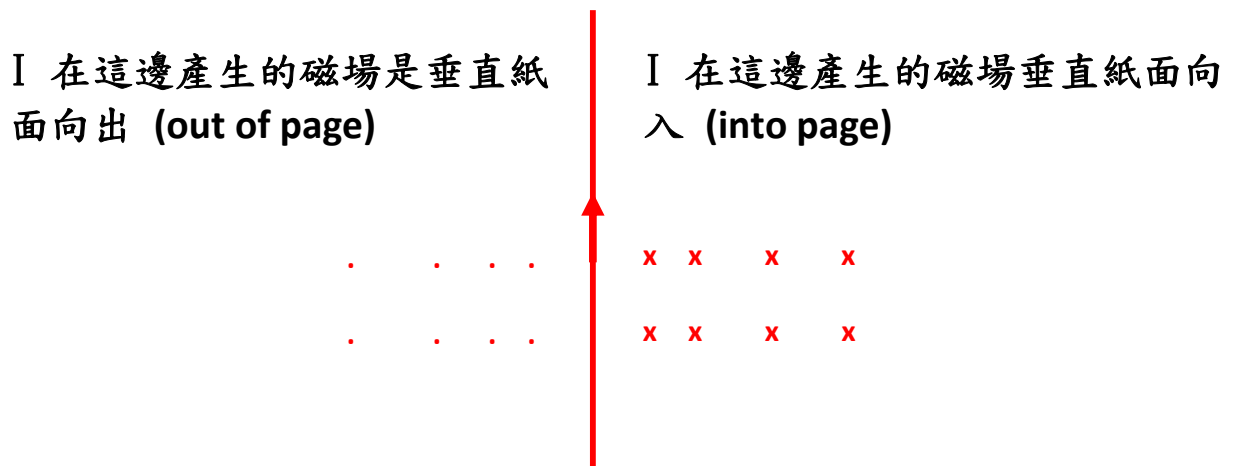
(可參考 <http://www.youtube.com/watch?v=waTF7kimmt8>)

若 v 與 r 是同方向的，那公式中的 $\vec{v} \times \vec{r}$ 是零，所以 $B = 0$

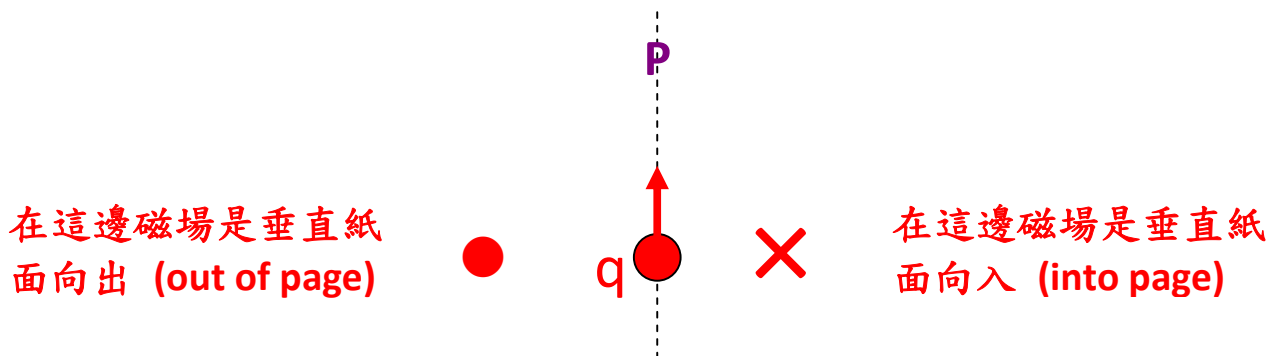


(2) 若你不熟悉以上公式，我們可作以下推論。

✚ 直電線通了電流後，在其左右的磁場



✚ 正電荷走動，就如一截小電流，所以很合理地推論在其左右的磁場為：



問題是在上圖的虛線上的點 P ，在該處 B 的方向如何？

點 P 左方的磁場是向出；點 P 右方的磁場是向入。所以 P 是這兩個反方向的過渡點。所以在此處磁場只有兩個可能性：

(i) 無限大（不定義），情況一如 $\tan\theta$ 從第一象限過渡到第二象限般，或

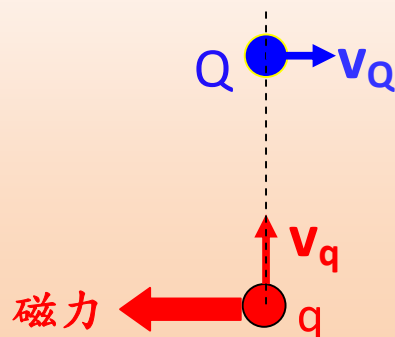
(ii) 零，情況一如 $\tan\theta$ 從第二象限過渡到第三象限般。

但 (i) 不合理，因為當點 P 離開電荷很遠時，電荷在該處不可能會產生無限大的影響。

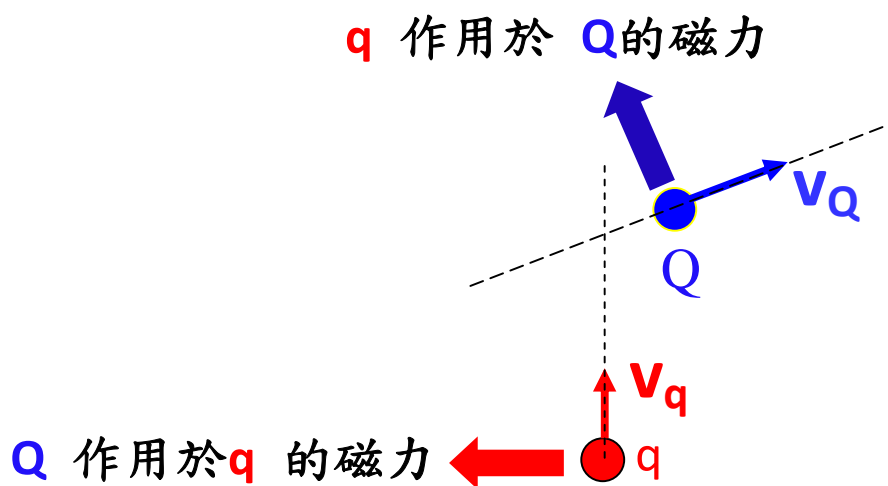
所以唯一的可能是在點 P ， $B = 0$ 。

既然 q 在 Q 的地方不產生磁場，所以 Q 此刻不受磁力作用。

Q 作用於 q 的磁力(有)，但
 q 作用於 Q 的磁力(沒有)。
所以作用力並不等於反作用力。



多時，移動中電荷之間的電磁相互作用都是不符合牛頓第三定律。例如下圖中雙方施於對方的磁力的量值相同，但方向不是相反。



牛頓第三定律可以失效，但動量守恆不曾失效。

事實上，**動量守恆定律是比牛頓第三定律更基本的基本定律。**

在本文討論的例中，牛頓第三定律不成立；但動量仍然守恆，關鍵的地方是除了電荷自己運動時所攜帶的動量外，「伴隨」它們而行的電磁場也攜帶動量。動量守恆是指整個系統的總動量。

Reference:

Introduction to Electrodynamics by David J. Griffiths

吳老師 (Chiu-king Ng)

物理勿勿理 <http://ngsir.netfirms.com>