PSSC物理
進修教材與補遺

陳育麟編譯

一九七九年五月廿

知識叢書出版社

PSSC 物理
進修教材與補遺

陳育麟編譯

知識叢書出版社

原　　序

PSSC 課程主要是介紹一些物理學的基本觀念，作爲高中三個學期或是二年的教材。也可以作爲大學的介紹性課程之一。

在讀這一本書的時候，想要收到較好的效果，最好是對照着PSSC（第三冊）裡面的各章一起來讀。對照表如后：

PSSC進修教材及補遺	PSSC第三冊
第一章，角動量	第二十四章：位能
第二、第三章：不可逆過程；熵	第二十五章：熱，分子運動和能量不滅。
第四、第五章：相對論運動學；速率，能量和質量。	第三十一章：電磁感應和電磁波。
第六、第七章，原子，分子和原子核	第三十四章：量子系統和原子構造。

本書力求保持PSSC原教材的精神。同時希望各位同學都能夠依照實驗導引來做實驗。第一，第二，第四，第五和第六各章在高中的課程裡面已經講到；第一章和第四章是屬於複習的性質，例舉了很多個實例。第三章和第七章是屬於新的教材，必須特別注意。

在這本書裡面所需要用到的數學工具比PSSC課程裡面的要高深一點，讀者必須要具有自然對數和基本微積分的觀念。

這本書是經過很多人用了很多年的時間絞盡腦汁才得到的成果。其中，第一章是我自己寫的，第二章是M. I.T. 的 Prof. Kerson Huang 寫的，第三章是遠自意大利，University of Bologna 的Prof. Bruno Ferrette寫的，第四章是University of British Columbia 的 prof. Derek Liversey 和我合寫的，第五章也是我自己寫的，第六章和第七章是 M. I. T. 的 prof. philip. Morrison寫的。如果沒有實驗導引所列舉的儀器，我們也不可能得到這本書的成果。實驗儀器大部分都是Florida State University 的 prof. Livesey 和prof. Guenter Schwarz以及Dr. James Strickland, Natheniel Burwask, John DeRoy 所設計的。在寫第一章的時候，，我曾經從 prof. Francis L. Friedman 那裡得到很多的幫助。後面幾章，也是靠 Judson B. cross, Prof. Arthur. Kerman 和Prof. R. W. Estin 的合作才完成的。

同時我還得感謝下面諸位對我的幫助。

Fil. dr. J. Adolfsson, Malmo Technical Gymnasium. Malmo, Sweden

D. Munay Alexander, Foothill College, Los Altos Hills, California.

Fil. Lec. Ingemar Bartholdson, General Gymnasium Stockholm, Sweden.

William Croft, Central Conneticut Stete College, New Britain Conn.

William S. Burton, George School, Pennsylvania.

Gavriel Elek, Ramot Hefer Institute, Haogen Maabarot, Isreal.

Hyman Goldberg, Massachusetts Institute of Technology.

Ervin H. Hoffart, Educational Service Incorporated.

Tage Johanson, Lund University, Sweden.

Andrea Julian, Edueational Service Incorporated.

Pierre Lucie, Catholic University, Rio de Janeiro, Brazil.

S. E. Mead, Boys High School, Hamilton, New Zealand.

Gerardo Melcher, University of Chile, Santiago, Chile.

A. W. K. Metzner, San Diego State College, San Diego, California.

Donald Nelson, Department of Education, Wellington, New Zealand.

Alfred Romer, St Lawerence University, Canton, New York.

Louis Smith, San Diego State College, San Diego, California.

Malcolm Smith, Massachursett Institute of Technology.

James Walter, Educational Services Incorporated.

Byron Youtz. Reed College, Portland, Oregan.

另外，承蒙George Cope 和他的工作人員提供了書中的照片, R. Paul

Larkin的編排工作，Benjamin T. Richards負責印刷出版，都是我衷心感激的。更得感謝印刷工廠與D. C. Heath公司的編排部門的合作。

Uri Haber-Scham
March 1966.

PSSC. 物理教科書總目錄

第一部份　宇　宙

第二部份　光學與波動

第三部份　力　學

第　一　章
角動量與角動量不滅

1　等面積定律

我們已經學過了幾種轉動：諸如等速圓周運動，行星繞太陽的橢圓運動與單擺沿橢圓路徑的擺動等等。作用於物體上的力雖然不同，但是有一點卻是相同的：那就是都是屬於有心力一即都指向空間的一定點。在上面的例子中，這一定點分別位於圓心，橢圓的焦點和橢圓的中心。三種情況，開普勒等面積定律皆成立；即在相等的時間距內，由力心點到物體的連線所掃過的面積皆相等。

圖 1 示懸掛於固定磁場中的磁棒的二種運動情形。儀器裝置的詳節示於圖 2。量了照片中的一些有關數量，你就可以確信，在這種情形下，等面積定律確實是成立的。

很自然地，我們會懷疑到是不是在所有的有心力運動中，等面積定律都成立呢？事實上，這可以直接從牛頓運動定律推論的出。要證明這一點，我們假設運動中的物體，所受的外力，作用

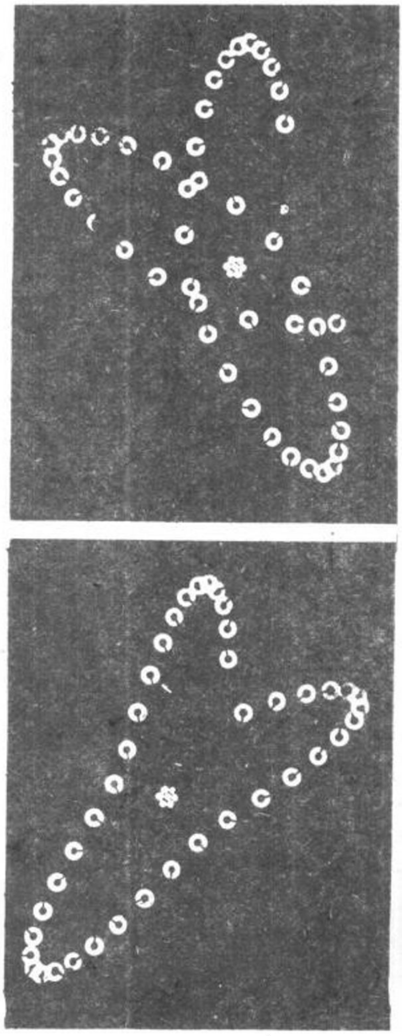


圖 1. 懸掛於磁場中天花板上的磁棒，其運動時的的頻閃觀測照片。即看圖 2。

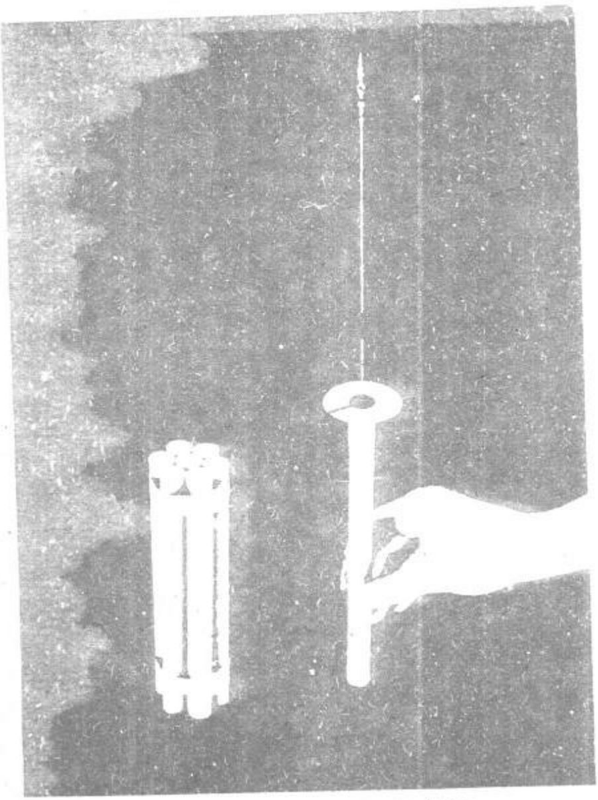


圖 2.　圖 1 中所用的一組磁鐵的外貌。

時間非常的短。可以想像物體在每秒鐘內受到一個尖銳的推力，這些推力都指向空間的某一固定點，推力的大小則無任何限制，可以為任意數值。

在這樣的情況下，物體運動的可能軌跡約如圖 3 所示。物體由A點出發，以定速度在一個單位時間內運動到B點，在B點受到指向O點的推力，就會以不同的速度（仍為常數）向C點運動。在C點又受到指向O點的推力，再運動到D。因為是在相等的時間距內掃過去的，我們選定了速度單位以後，向量$\overrightarrow{AB}$，$\overrightarrow{BC}$皆係代表物體在某一段區間內的速度。圖中虛線所示的向量，則係表示物體在B．C 等點，受到衝力後，速度的變化量$\Delta\overrightarrow{V}$。

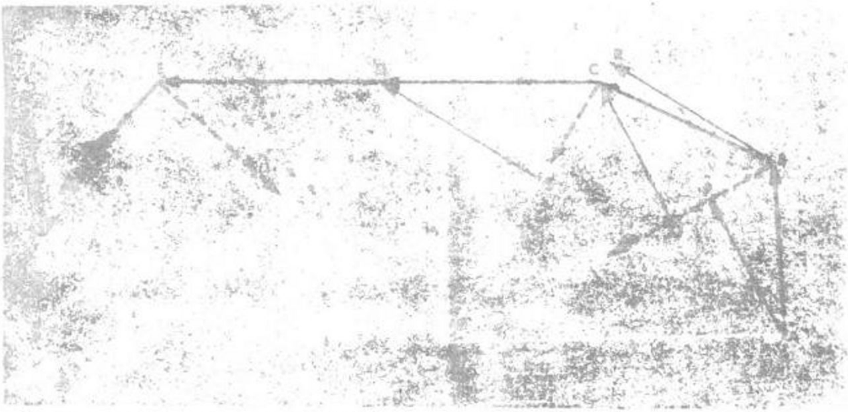


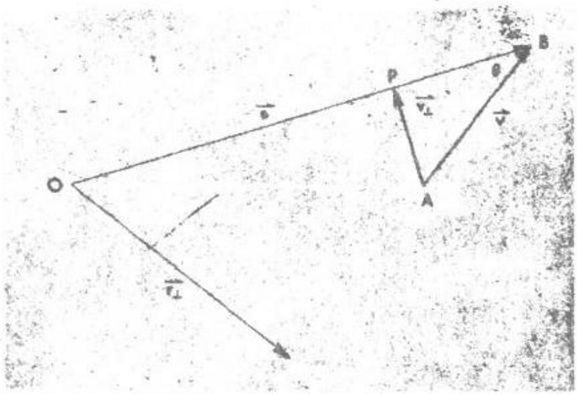
圖3. 受有數種有心衝量時，物體的運動情形。圖中的粗虛線表示由於衝量所引起的速度變化。在D點，衝量為零。

在B點物體所受衝力的方向為$\overrightarrow{BO}$，故與$\overrightarrow{OB}$方向垂直的$\overrightarrow{AB}$分量不變；即在受衝量以前，$\overrightarrow{AB}$的分量$\overrightarrow{AP}$與受衝量以後，$\overrightarrow{BC}$的分量$\overrightarrow{QC}$相等。同理，在C點，物體未受衝量以前，$\overrightarrow{BC}$的分量$\overrightarrow{BR}$與受衝量以後，$\overrightarrow{CD}$的分量$\overrightarrow{SD}$也相等。

位移向量在每單位時間內掃過的面積分別為OAB，OBC，OCD等三角形的面積。先看三角形OAB與OBC，底邊OB公用，剛才又講過了高AP與QC是相等的，所以二個三角形的面積相等。再看三角形OBC與OCD，底邊OC公用，高$BR = SD$，所以$OCD = OBC = OAB$。同理可證出所有連續的三角形，面積都相等。由此可以看出，等面積定理成立。

我們在證明的過程中，係假設所有的作有力都指向空間中的某一定點O，並沒有考慮每秒鐘衝量的大小，衝量的大小是沒有甚麼關係的，以在B．C．D點的衝量而言，都不相同；在D點，衝量實等於零。由於瞬時作用力為有心力，使我們確信垂直於物體位置和中心連線的速度分量是不變的。

事實上，物體係沿一曲線運動，作用在物體上的力是連續的。但是我們仍然可以利用近似的方法，將路徑切成一小段一小段，而證得相同的結果，線段愈取愈短，就愈趨近於實際的路徑了。



4 $rv_\perp = r_\perp v = rv\sin\theta$ = 三角形OAB面積的二倍。

2. 角動量

我們可以把等面積定律視做是伽利略慣性定律的擴張：如果沒有任何（非平衡）外力的作用，物體的速度就會保持不變。受有心力的作用以後，物體的速度變了，但是位移向量與速度垂直分量的乘積仍然保持不變：$rv_\perp$ = 常數。（此常數等於每單位時間內掃過面積的二倍。）至於物體的質量對本定律並無任何影響。

我們在描述物體的運動的時候，利用到了 v 與 $rv_\perp$ 等數量，如果要把運動和力連在一起，就必須把質量也考慮進去。我們介紹動量 $\vec{p} = m\vec{v}$，發現對互相作用的物體而言，它們的總動量是不變的，但是它們的速度和卻並不是不變的。同樣地，我們介紹角動量 $L = rp_\perp = mrv_\perp$。在第六節我們就可看到，某些適當的情況，總角動量是不變的，但是各個 $rv_\perp$ 本身的總和卻並不是不變的。

在圖 4 裡面，可以看出 $rv_\perp$ 等於 $r_\perp v$，都是三角形 OAB 面積的二倍，此乘積也可以寫爲 $rv\sin\theta$。利用此關係式可得 $L = mrv_\perp = mr_\perp v = mrv \sin\theta$。注意在角動量的定義裡面包含有位置向量 $\vec{r}$，是從某一定點量起的。即使物體以固定的速度運動，其角動量卻並不一定相同，和參考點的選擇有着密切的關係。

3. 能量，角動量與軌道

物體在有心力場中運動，其總能量（動能加位能）恆保持不變。對作用力的中心點而言，其角動量也是不變的。具有不同的總能量和角動量，軌道也就不相同。

譬如，阿伐粒子在金原子核的力場中運動。趨近於原子核的時候，阿伐粒子就會受到一有心排斥力場的作用（看PSSC 第三十二章），動能減少了，位能卻增加了。到底阿伐粒子與原子核的距離可以近到什麼樣的程度呢？能量不滅定律告訴我們，最多能近到其最初的動能（離原子核很遠時的動能）全部變爲位能：$\frac{1}{2}mv^2_{最初的}=U$ 時爲止。到達這一點，阿伐粒子就會停止下來；也就沒有角動量了。角動量不滅原理告訴我們，阿伐粒子一開始就應該沒有角動量：即 $mrv_{\perp}=0$。因爲 r 不等於零，所以必須 $v_{\perp}=0$，阿伐

圖5. 一個阿伐粒子趨近於位於0點的原子核，二種不同軌道的情形。（圖中白線所示）。初速度相同，則較低的軌道與原子核的距離會比較小。

粒子必定是沿着直線直向金原子核運動（圖 5 ）。換句話說，如果一開始，阿伐粒子（以同樣的速度）並不是正好沿着一直線直接射向金原子核，則必定具有角動量，設目標的距離爲 b ，對原子核來說，阿伐粒子的角動量爲

$$L = mrv_{\perp} = mvr_{\perp} = mv_{\text{最初的}}b$$

從這裡可以立刻看出，阿伐粒子不會像前面那樣的趨近於原子核了，因爲在距離最近點，距離爲 r' ，速度爲 $\vec{v}_{\perp}'$ ，要滿足 $mr'v_{\perp}' = mv_{\text{最初的}}b$ ，一定會有動能。對排斥力場來說，阿伐粒子不會像沒有角動量的時候那樣的接近原子核（圖 5 ）。二個阿伐粒子沿着相同的方向趨近於同一原子核。如果它們的角動量不同，即使動能相同，軌道也不會相同的。

4. 特例：衛星運動

在前一節裡面，我們討論了物體在有心力場中的運動，其能量，角動量和軌道間的關係。對衛星運動而言，我們可進一步地來研究一下三者之間的關係。在數量的解析上，我們祇用到了重力場的平方反比定律；結論可以用於其他任何的平方反比力場，特別是用在電力場中。

就我們所知道的，地球的衛星係以地球爲焦點，繞地球作橢圓運動。橢圓的定義乃某一點 P 的軌跡，恰好使 P 點與二固定點（稱爲焦點）之間的距離和爲一常數 2a （圖 6 ）。每一個橢圓的特性，可以用這個常數和二焦點的距離 $2C$ 描述之。也可以用半長軸 a 與半短軸 b 描述之，二種描述法之間的關係示於圖 6 中。

a 與 b 與衛星運動的總能量 E 和角動量 L 之間的關係是怎麼樣的呢？第一步讓我們先找出 E 與 L 之間的關係。

將衛星的速度 $\vec{v}$ 分解爲二個分量，一個爲沿位置向量的分量，一個爲垂直於位置向量的分量：

$$\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_{\perp}$$

從圖 7 裡面可以看出， $v^2 = v_r^2 + v_{\perp}^2$ ，動能可以寫爲

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_r^2 + \frac{1}{2}mv_{\perp}^2 \;:$$

現在我們以 L 來表示 $v_{\perp}$ ：

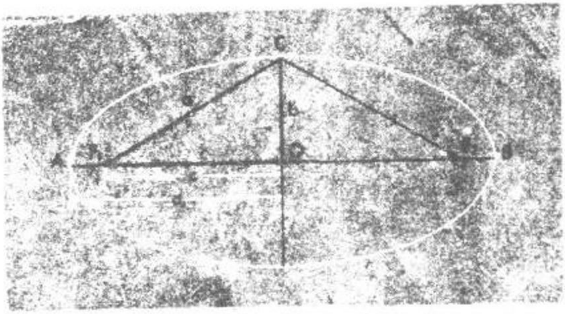


圖6. A點在橢圓上$AF_1+AF_2=2a$。由對稱關係知$AF_1=F_2B$，所以$AB=2a$，半長軸就等於 a 。又C點亦在橢圓上，$CF_1+CF_2=2a$，由對稱關係知$CF_1=CF_2$，所以$CF_1=a$，因爲OCF_1是一個直角三角形，所以$b^2=a^2-b^2$

$$v_\perp=\frac{L}{mr}.$$

代入上式得：

$$E_K=\frac{1}{2}mv_r^2+\frac{1}{2}\frac{L^2}{mr^2}.$$

總能量就變爲

$$E=E_K+U_r=\frac{1}{2}mv_r^2+\frac{1}{2}\frac{L^2}{mr^2}-\frac{GMm}{r^2}.$$

M與m分別爲地球與衛星的質量，G爲萬有引力常數。這個式子表示出在軌道上任何一點的總能量。在距離地球最遠的地方和最近的地方，v_r 都等於零。在這一點的距離以r_0表之，則在這一點的能量爲：

$$E=\frac{L^2}{2mr_0^2}-\frac{GMm}{r_0}$$

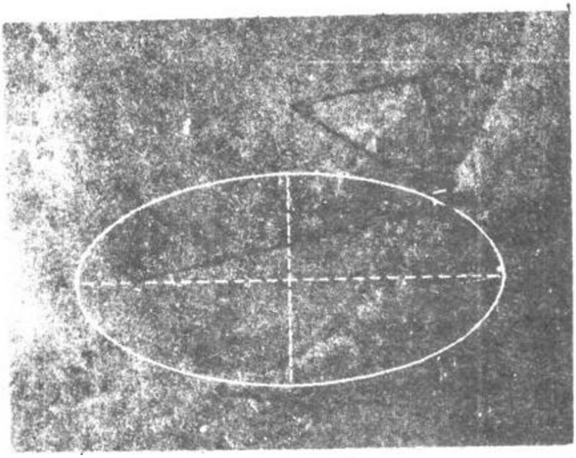


圖 7. 速度$\vec{v}$分解成平行於$\vec{r}$的分量$\vec{v_r}$與垂直於$\vec{r}$的分量$\vec{v_\perp}$。

兩邊同乘$\frac{r_0^2}{E}$，得 r_0 的二次方程式：

$$r_0^2 + \frac{GMm}{E} r_0 - \frac{L^2}{2mE} = 0$$

由圖 6 知這一條方程式的二組解爲

$$r_0 = a + c \quad 與 \quad r_0 = a - c \ .$$

進一步看，二次方程式的性質告訴我們，二組解的和等於負的 r_0 項的係數；即

$$(a+c) + (a-c) = -\frac{GMm}{E}$$

二組解的乘積等於常數項：

$$(a+c)(a-c) = -\frac{L^2}{2mE} \ .$$

從第一條方程式可得

$$2a = -\frac{GMm}{E} \quad \text{即} \quad a = -\frac{GMm}{2E}$$

從第二條方程式，並利用 a，c 與半短軸 b 間的關係式（看圖6），可得

$$a^2 - c^2 = b^2 = -\frac{L^2}{2mE^2}$$

$$\text{即} \qquad b = \frac{L}{\sqrt{-2mE}}.$$

（因爲衛星的軌道是一個封閉的曲線，總能量 E 應該是負的，我們所要取的乃是一個正數的平方根。參看PSSC 教材第二十四章，第6節）。

這些方程式表示出橢圓軌道與能量和角動量之間的關係，橢圓的半長軸 a 祇和能量有關係。我們發射一個衛星，則衛星的橢圓軌道的長軸祇和衛星脫離推進系統時候的位置和當時的速率有關，和運動的方向是無關的。

在另外一方面，半短軸則與衛星脫離推進系統的那一瞬間的運動方向有關。因爲 $L = mrv\sin\theta$，對固定的能量而言，b 與 L 成正比，我們可以看出，當速度與位置向量互相垂直的時候，b 最大。

衛星離地球最近的地方，距離爲

$$r_{\text{最小值}} = a - c = a - \sqrt{a^2 - b^2}$$

b 很小的時候，式中的平方根趨近於 a，$r_{\text{最小值}}$ 變的很小很小。這個時候，橢圓很扁，焦點趨近於長軸的兩端。b 愈變愈大，變到恰好等於 a 的時候，$r_{\text{最小值}} = a$，橢圓變成了一個圓，二個焦點與圓心重合在一起。因爲 b 是和 L 成正比的，所以對某一固定能量而言，圓形軌道的時候，角動量有最大值。

5. 角動量：是一種向量嗎？

在前面幾節裡面，我們學過了衛星橢圓軌道的形狀與能量和角動量之間的關係。但是祇根據形狀並不能完全地說明了軌道；軌道是在一平面上，能量與數量 $rp_\perp$ 並沒有告訴我們這個平面是在空間中的那一個方位。是不是我

們必須再尋求更多的資料以決定軌道平面所在空間中的方位呢？抑或在某一些已知的資料中，我們可以找出決定方位的方法，但是到底是那一種方法呢？

在任何時刻，位置向量$\vec{r}$與動量向量$\vec{p}$可以定義出一個平面。這個平面包含了整個軌道，因爲使$\vec{p}$變化的力總永遠沿着$\vec{r}$方向的，動量永遠不會得到一個超出這個平面以外的分量。這樣我們就可以用能量，角動量，和軌道所在平面在空間的方位，來將衞星的軌道作一番更詳盡的描述了。我們可以利用垂直於平面的直線，來描述平面的方向性，因爲，垂直於一平面的直線都是互相平行的，它們的方向也就是固定的了。

像這樣的直線，方向需要同時垂直於$\vec{r}$和$\vec{p}$。而$rp_{\perp}$恰好等於角動量。我們會問了是不是這個方向和大小合在一起恰好就形成了一個向量呢？我們已經學過（PSSC 第六章第2節）向量乃是它的加減運算法依照位移的加減運算法來計算，並且向量可以分解爲沿直角坐標軸的二個分量。我們能夠找到這樣的一個量嗎？大小恰好等於$rp_{\perp}$且同時垂直於$\vec{r}$和$\vec{p}$。我們知道$rp_{\perp}$乃位置向量每單位時間內所掃過面積的$2m$倍，如果此面積具有向量的性質，它在三個互相垂直面上的投影必須適合向量的加法律。圖8示一個三角形的模型，投影在三個互相垂直的平面上，根據實際的量度，三個投影三角形的面積恰好符合向量加法的原則：即$X^2+Y^2+Z^2=A^2$，這裡X, Y, Z分別表示三個投影三角形的面積，A則表示原三角形的面積。其他不同方位的三角形也會有同樣的關係存在。在這裡我們特別選擇了利用實驗的方法來證明角動量是一個。向量是爲了要給各位留下一個深刻的印象。

有一點需要進一步說明的，向量$\vec{r}$與$\vec{p}$所定義的平面，可以利用一條垂直於它的直線描敍之，但是向量具有一定的方向，然而這一條直線具有二個相反的方向，我們到底應該選那一個方向作爲角動量的方向呢？這乃是屬於選擇上的問題，選定了以後就必須一直用這個方法來表示了。下面是一般所採取的步驟：使右手姆指指向$\vec{r}$的方向，食指指向$\vec{p}$的方向，則同時垂直於二者的中指所指的方向，即爲角動量的方向。

這種二個向量相乘的標準符號：

$$\vec{L}=\vec{\mathbf{r}}\times\vec{\mathbf{p}}$$ 稱爲矢積或是外積。

一般情形的表示法可以寫爲：$\vec{\mathbf{c}}=\vec{\mathbf{a}}\times\vec{\mathbf{b}}$.

$\vec{\mathbf{a}}$，$\vec{\mathbf{b}}$爲任意二個向量，$\vec{\mathbf{c}}$就垂直於$\vec{\mathbf{a}}$，$\vec{\mathbf{b}}$所定義的平面，大小則爲：

$$c=ab_{\perp}=a_{\perp}b\ .$$