

以磁力模擬萬有引力的平面實驗

高中組 第一名

縣 市：台北市

校 名：景美女中

作 者：胡靜翔

指導教師：劉秀貞



自幼父母給我很好的科學學習環境，國小就特別喜歡挑戰數學難題。國中開始試作物理科展，很幸運能得到全國佳作。高一整年，都到清大物理系旁聽資優生研習營的課程，學到許多常識，更加強了物理基礎。此外，在高一時開始一項物理實驗，剛開始的實驗十分困難，直到高三才得以突破，並獲得第四十屆全國科展高中組物理科第一名。雖然實驗的過程十分辛苦，但是收穫真的很多。希望未來在大學和研究所學習中，能滿足我的求知慾，讓我悠遊於自然科學的領域中。

關鍵詞：磁力、磁力運動、刻普勒定律

一、研究動機

最初是對星球運動的好奇，隨後不服輸的心理一直驅使著我。三年來在這兩種心情交互支持下，逐項突破主要困難問題，並持續進行探討與研究。

二、研究目的

主要目的為設計特殊形式的磁鐵、夾具及實驗，以進行磁力的平面實驗，期對刻普勒定律作初步驗證與比對。次要目的為實驗驗證所選用的特殊磁鐵在某一範圍內之「磁力-距離的關係」與「萬有引力-距離的關係」具有近似相同的模式。

三、研究設備及儀器架設

關鍵器材：主星磁鐵 M、衛星磁鐵 m 、 主星磁鐵夾具及低壓實驗櫃。

主要器材：彈簧秤、直尺、鏡子、吸塵器、坐標板、磁力計、攝/錄放影機等。

四、研究過程

整個研究過程可分為：

(a)概念構想、(b)磁鐵設計與試製、(c)夾具設計與製作、 (d)儀器架設、(e)磁力量測、(f)磁力運動實驗、(g)雙星運動實驗及(h)實驗櫃中實驗等階段。摘要敘述如下：

(一)概念構想

萬有引力導致星球運動，例如人造衛星的運動。那麼能否設計、試製一組特殊磁鐵以磁力來作模擬實驗呢？本作品所提概念為：用兩個在圓周徑向磁場均勻的磁鐵，在水平面上作模擬實驗。主要方法及步驟如下：

- 1.將一磁鐵固定作為主星磁鐵 M，以模擬質量極大且近似不動的主星；
- 2.將另一個磁鐵以長線吊起作為衛星磁鐵m，以模擬衛星。其吊點位置在主星磁鐵的正上方，並調整線長，使兩個磁鐵在同一水平面上；
- 3.將m以初始速度自初始位置釋放，如此就可開始進行實驗了！

(二) 磁鐵選擇與製作

有了上述構想，剩下來的問題最關鍵的當然是：要用什麼形式的磁鐵了！

- 1.基本構想：一極必須在圓周一圈，那麼另一極應該在那裡？

方法一

另一極可在無窮遠---可以滿足 M 的需求。

作法一

作一根圓柱形長長的磁鐵，一個磁極在圓柱一端的圓周，另 一個磁極在圓柱另一端的圓形端面。

方法二

另一極可在圓的內圈---可以滿足m的需求。

作法二

作一個圓環形的柱狀磁鐵，一個磁極在圓環的外圈圓周，另一個磁極在圓環的內圈圓周。

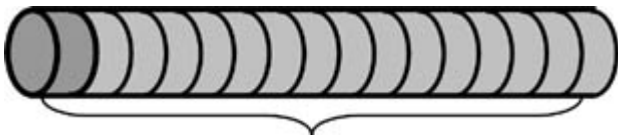
- 2.磁鐵試製：

- (1)磁鐵材料選用及歷程

經過三年辛苦、漫長及一再嘗試後，終於找到廠家贊助的 Nd-Fe-B 強力磁鐵，這才獲得突破。最後選用直徑12mm、高8mm 圓柱形磁鐵及未充磁材料。

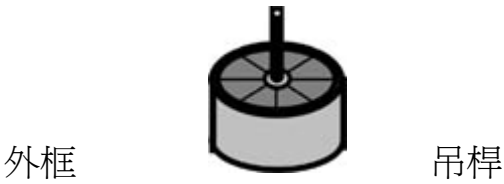
- (2)主星磁鐵 M 製作：

將15(30)個上述磁鐵串吸在一起，另作一個相同尺寸的軟鐵串吸在 S 極，便完成M製作。其示意圖如圖一。



圖一 主星磁鐵 M示意圖

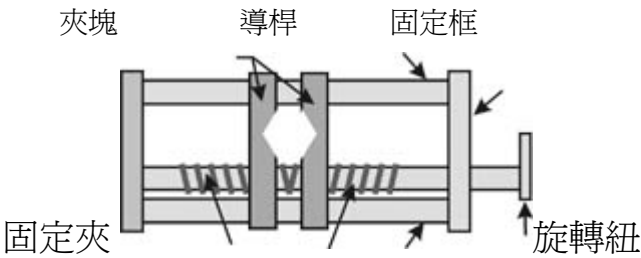
- (3)衛星磁鐵 m 製作:衛星磁鐵 m 的形狀應為一柱狀圓環。以未充磁材料切割成8個相同的扇形柱狀磁塊，以外圈為N 極充磁，於充磁後強行塞入一圓柱形外框內，再加一小吊桿，便完成 m 的製作，示意圖如圖二。



圖二 衛星磁鐵 m示意圖

- 3.主星磁鐵 M 夾具製作(固定主星磁鐵 M、使用非導磁材料)：

製作概念示意圖如圖三。使用時將主星磁鐵放在兩個夾塊之間，轉動旋轉紐，即可使夾塊夾緊或鬆開。



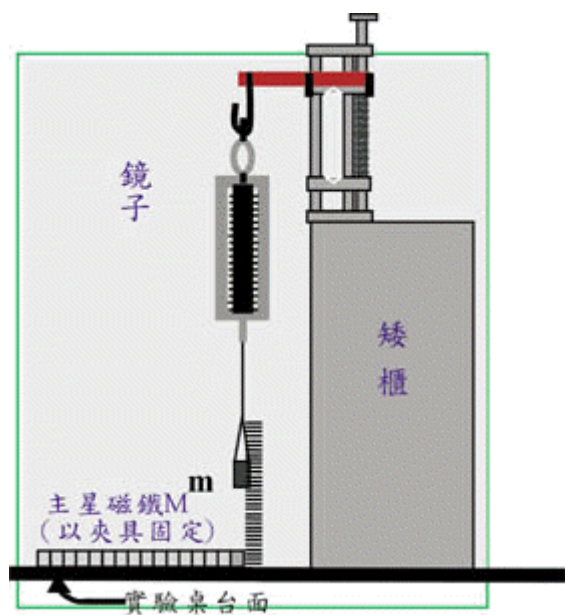
圖三 主星磁鐵夾具製作概念示意圖

(四)儀具架設

1.磁力 距離量測儀具架設：

架設示意圖如圖四，摘要步驟如下：

- (1)將主星磁鐵夾具立起、張開夾塊並在其上綁一枝竹筷，放在矮櫃上；其後放一面大鏡子；
- (2)將彈簧秤、配重塊(視需要) 及衛星磁鐵串在竹筷上，調整 m吊線長度；
- (3)將M夾好平放在 m 正下方；並在 m 及 M 正後方鏡子上貼上直尺便完成架設。

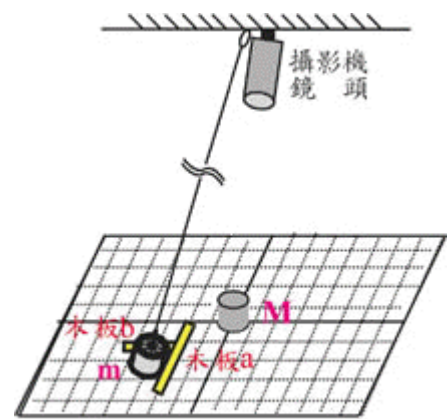


圖四 磁力量測儀具架設示意圖

2.磁力運動實驗儀具架設：

儀具架設示意圖如圖五，摘要步驟如下：

- (1)將m以長線吊在天花板上並調整線長；
- (2)以夾具將M夾妥，放在m吊點正下方；
- (3)將坐標板（原點有圓孔）放在 M 夾具上，使M自原點的圓孔突出坐標板之上；
- (4)在天花板上m吊點旁固定攝影機鏡頭；
- (5)放置木板a、b以決定m起始位置及方向；
- (6)接好攝、錄影機，便完成架設。



圖五 磁力運動實驗儀具架設示意圖

(五)磁力量測（參考圖四）

按照圖四的架構及相關步驟架好儀具，以量取主星磁鐵與衛星磁鐵間磁力-距離的關係。衛星磁鐵計有四種:ma、ms、mr及mn；彈簧秤計有三種:s1、s2及s3。各衛星磁鐵的形狀及組成方式相同，其不同點為尺寸及材質：

ma：外圈半徑 $r_o=5\text{mm}$ 、內圈半徑 $r_i=1.5\text{mm}$ 、高 $h=8\text{mm}$ 及鋁質外框

ms：使用鐵質外框其餘均同ma，且使用ma之扇形磁鐵。

mr：使用ma之扇形磁鐵並重新反向充磁，外框圓柱部份為鐵質其餘為鋁質；

mn： $r_o=2.5\text{mm}$ 、 $r_i=1.25\text{mm}$ 、 $h=10\text{mm}$ 及鋁質外框。

各彈簧秤的彈力係數分別爲： $k_1=7\text{g/cm}$ 、 $k_2=25\text{g/cm}$ 及 $k_3=83.3\text{g/cm}$ 首先使用s1量測1g重及2g重磁力-距離的關係；再依序使用s2及s3以分量測10g重及20g重磁力-距離的關係。每次量測均先調開M與m的間距、轉動夾具的旋轉鈕使m徐徐下降，直到彈簧秤指示在需要的刻度；然後讀取M與m的距離。每次讀取均利用鏡中影子，以維持視線水平。

(六)磁力運動實驗（儀具架設參考圖五）

整個過程計有：(a)初期觀察實驗、(b)以 m_a 作運動實驗及(c)以 m_s 作運動實驗三個階段。依據觀察實驗的心得，將座標板方格調整爲1cm x1cm並使用木板a、b來決定衛星磁鐵的釋放位置、起始位置及方向，這也間接決定了衛星磁鐵的起始速度。實驗操作方式爲：(a)將木板a及b放在所要位置、(b)將衛星磁鐵放在靠近座標板外側由木板a及b所形成的夾角裡、(c)迅速移走木板b則衛星磁鐵沿木板a自然滑下、(d)當衛星磁鐵滑離木板a時迅速移走木板a。此時運動實驗已在進行了，直到衛星磁鐵吸到主星磁鐵既完成一次實驗。按照上述作法及程序分別以 m_a 、 m_s 及 m_n 進行運動實驗，每次實驗均作錄影以便觀察及分析。

(七)雙星磁力運動實驗(參考實驗櫃示意圖)

按照圖五的方式在實驗櫃內架好儀具，並以兩根線吊起 m_r 及 m_n 作運動實驗。使用木板a、b及木板a、b來決定 m_r 及 m_n 的釋放位置、起始位置及起始方向和兩星磁鐵的起始速度。操作方式與前節相似。

(八)實驗櫃中磁力運動實驗(參考實驗櫃示意圖)

檢討上述實驗，發現導致誤差的主要因素爲：空氣阻力太大及衛星磁鐵磁力不均。改進方案爲: 製作真空(低壓) 實驗櫃及改變衛星磁鐵形態。其實驗構想及實驗設備設計概念如下。

1.空氣阻力的克服：爲了減少空氣阻力，我們利用木心板作實驗櫃(示意圖如圖六)，再用塑膠布密封，實驗時先抽出內部空氣，以降低壓力並減少空氣阻力。分項說明如下：

(1)低壓實驗櫃本體(參考圖六)

側邊三面及上下二面皆由木板釘成，正面則爲壓克力板，以方便觀察。低壓箱外用塑膠布及矽膠緊緊封密封，使木箱內部爲密閉空間。壓克力面板上設有抽氣孔、操作桿、操作孔及備用操作孔與備用抽氣孔，均以矽膠密封。

(2)三腳座

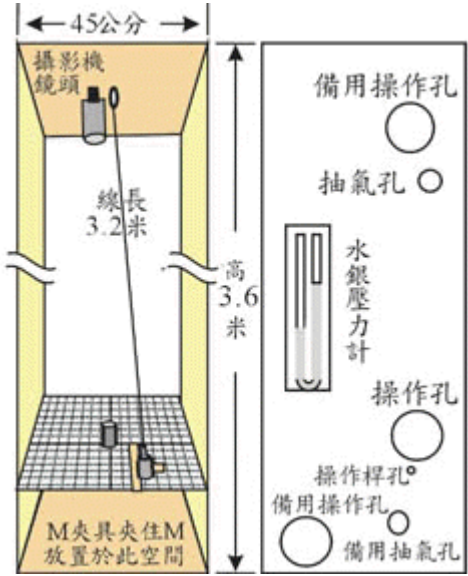
此爲一下面有三個高度調整腳的木板，低壓箱放置在上面，便可微量調整低壓箱的斜度，以使衛星磁鐵 m_n 吊掛點位於主星磁鐵正上方。

(3)水銀壓力計

此爲以塑膠管自製、一端封閉的水銀壓力計，密封在實驗櫃內，以量取實驗櫃內壓力。

2.衛星磁鐵徑方向磁力不均的改善

重新製作衛星磁鐵 m_n 。製作時，多做一些扇形磁鐵，從中挑選磁場強度較強且近似者，並按其正、負誤差交互放置，以利改善。而磁鐵外半徑 r_o 縮小是爲了使之更接近質點；高度 h 加長則可增加磁力。



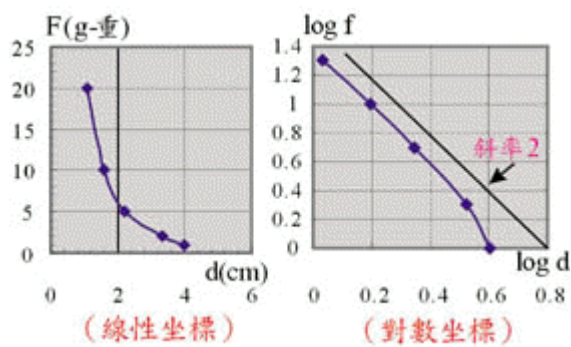
圖六 低壓實驗櫃及面板配置示意圖

五、研究結果

(一)磁力量測結果：(數據略)

1.衛星磁鐵 m_a 與主星磁鐵M之磁力-距離關係：

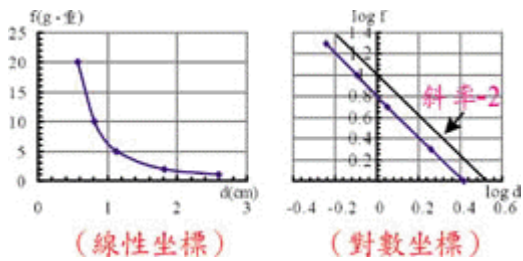
m_a 、 m_s 及 m_r 之8片扇形磁鐵均相同，此8片扇形磁鐵的磁場強度介於 4 →4.39千-高斯之間;與其平均值的誤差範圍爲 - 3.38% →6.04%。衛星磁鐵 m_a 與主星磁鐵M之磁力-距離關係分別以線性坐標及對數坐標表示如下列圖七。



圖七 ma-M 磁力-距離關係圖

2. 衛星磁鐵mn 與主星磁鐵M之磁力-距離關係

衛星磁鐵 mn 的8片扇形磁鐵是由17片中選出的，此17片扇形磁鐵的磁場強度分佈在3.52→3.89 千-高斯之間，誤差範圍 - 5.77%→4.20% 。選出其中場強較強且均勻的8片，故其磁場強分佈在3.81→3.89 千-高斯之間，誤差範圍減少為 - 1.11% → 0.97% ，顯然已獲良好改善。再將選出的8片按負、正交互配置，如此構成的mn其與M之磁力-距離關係如圖八。

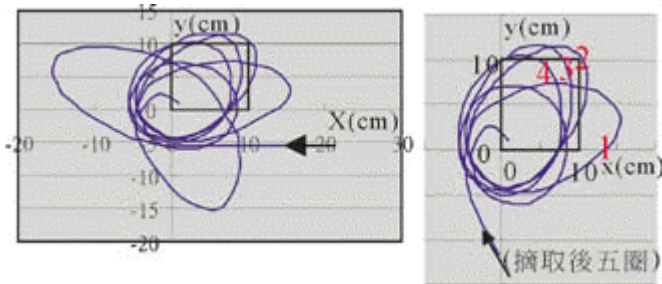


圖八 mn-M 磁力-距離關係圖

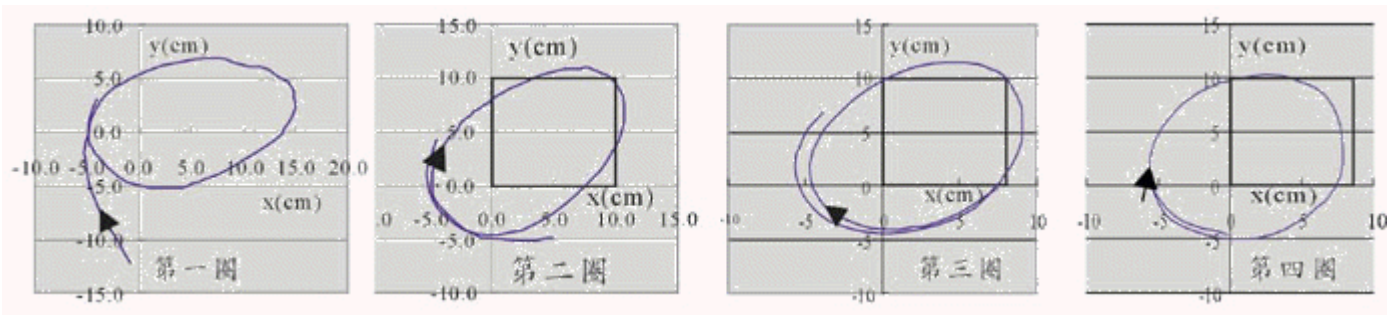
(二) 磁力運動實驗結果

1. 以ma做作磁力運動實驗

使用衛星磁鐵 ma 所作運動實驗軌跡如圖ma-1，分列一至四圈的軌跡圖如圖 ma-2，然後再以橢圓來近似各圈軌跡，如圖 ma-3及圖ma-4。



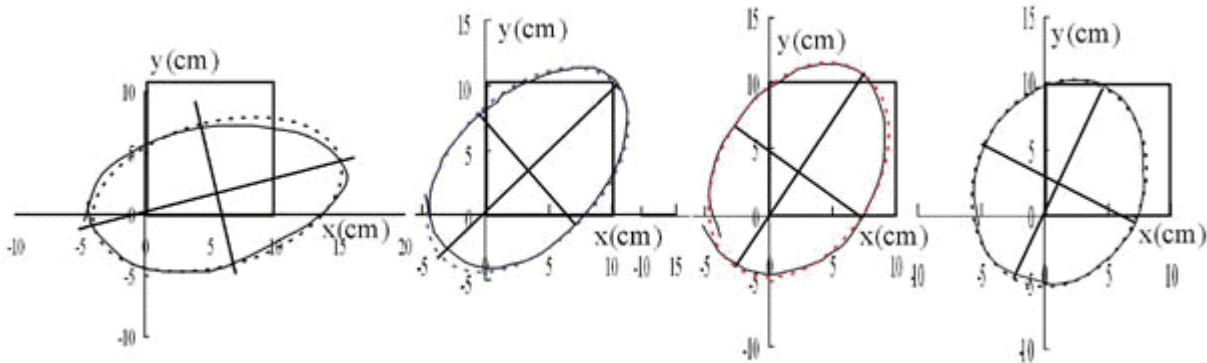
圖ma-1 ma全程軌跡圖



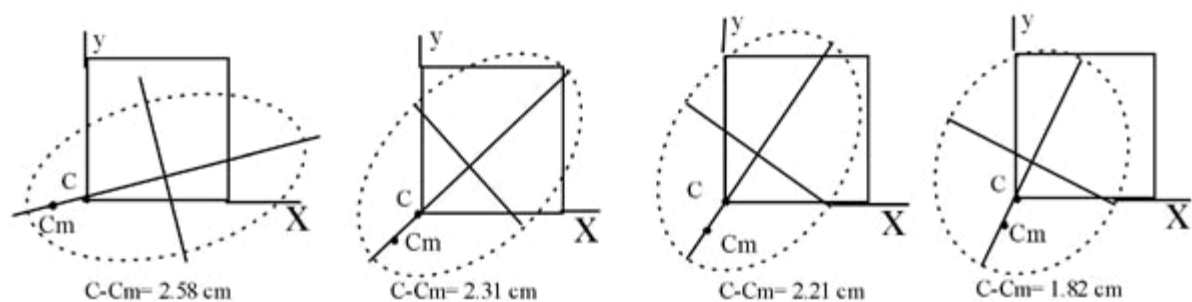
圖ma-2 ma一至四圈軌跡圖

(1) 橢圓形軌道

以 -x 軸為基準截取各圈軌跡，並選取橢圓與所截取的各圈軌跡來作近似如圖ma-3及圖ma-4。

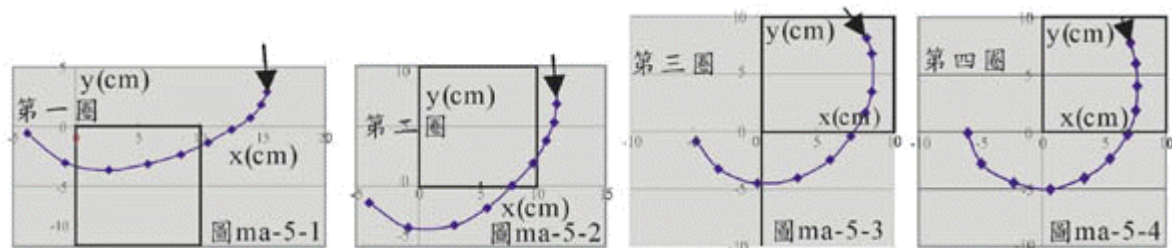


圖ma-3 ma一至四圈軌跡近似橢圓

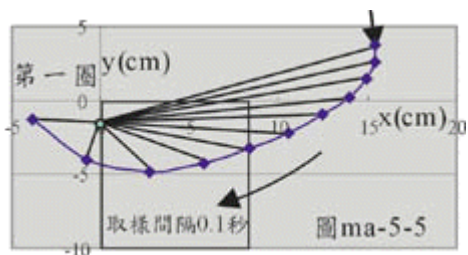


圖ma-4 ma一至四圈近似橢圓分析圖

(2)單位時間掃過的面積



由圖ma-2各圈遠距點（即右上角長軸端點）附近沿軌跡線每0.1秒（錄影3格）選一點，直到 -x軸附近。每一圈軌跡取11點，計有10個間格，分如圖ma-5 的1 - 4圖。軌跡線上的各點為ma運動時的位置，座標原點即為主星磁鐵M的位置。以ma-5-1為例將軌跡上的各點分別與原點連線，形成10個三角形，如圖ma-5-5。每個三角形的面積即為ma於該位置在0.1秒所掃過的面積。圖ma-5各圈取樣點與坐標原點均構成10個三角形，每個三角形的面積即為 ma 在該圈、該位置於0.1秒所掃過的面積。各圈各三角形的面積(略，請參見作品說明書p.16)。各圈0.1秒所掃過面積的平均值依序為:8.186、7.853、7.813及7.393 平方公分。



圖ma-5 單位時間掃過面積取樣圖

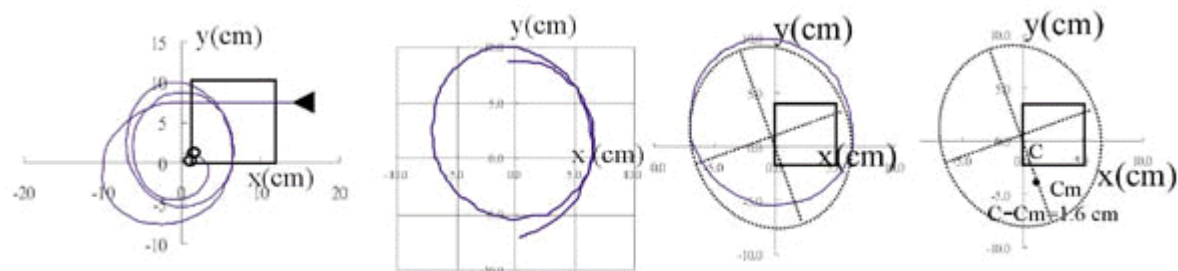
(3)軸長與週期的關係

ma的軌跡係以每秒30片拍攝錄影，從ma軌跡錄影光碟讀取圖ma-3各圈軌跡格數而算出ma各圈繞行時間T分別為：2.033秒、2.000秒、2.067秒及2.100秒。再由圖ma-3（或圖ma-4）量出各圈近似橢圓形的軸長R，分別為：7.73cm，7.55cm，7.445cm及7.21cm。再計算出各圈 R^3/T^2 的值依序為:111.72 107.81 96.61 84.99。

2.以ms作磁力運動實驗(參見作品說明書pp.17-19)

(1)ms橢圓形軌道

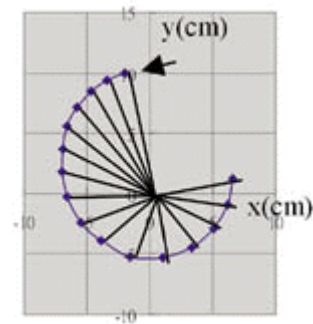
ms的形態為：a、仍用ma的8片扇形磁鐵；b、但按磁場強度正負誤差交叉放置；c、將ma的鋁質外框換成鐵質外框。按照相同的程序及步驟以ms作運動實驗，其全程軌跡、近似橢圓及分析圖分別如下列各圖：



(2)單位時間掃過面積(數據如作品說明書p.18表八)

由圖 ms-3左上角長軸頂點附近沿軌跡線每 0.1秒取一軌跡點，直到正x軸附近為止。將各點分別與坐標原點連線，所形成的三角形如圖ms-5所示。依序算出每一三角形的面積，既為每0.1秒掃過的面積(平方公分/0.1秒)，依序如下：

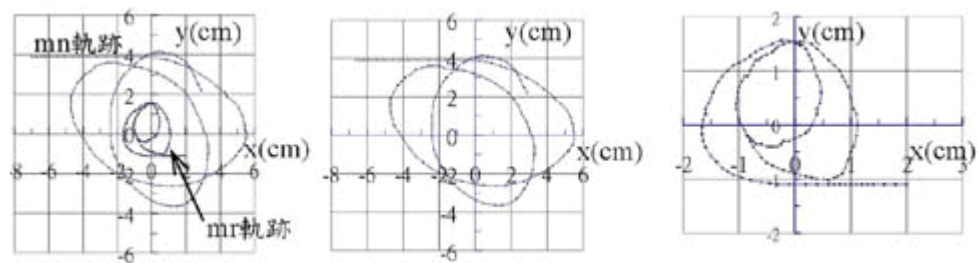
7.60 7.64 7.73 7.52 7.11 6.74 6.99 7.10 6.05 7.02 6.84 6.50 6.69 6.70 6.69



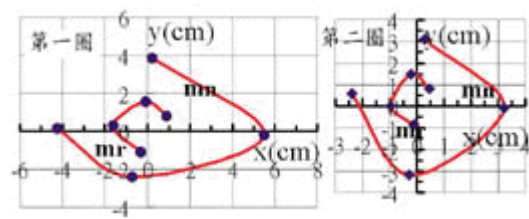
圖ms-5 單位時間掃過面積

(三)雙星運動實驗結果

以mr及mn在實驗櫃中執行雙星運動實驗，兩星同步軌跡及mn、mr各別軌跡分別如下列圖md、圖md-1及圖md-2。



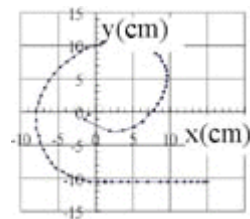
選取mn 及mr兩星軌跡與座標軸(附近)交點之座標，聯同同步編號如說明書p.21 表九，各點位置如下列圖md-3所示，其中各合成中心位置變化及其與原點距離分別如下列圖md-4及md-5所示。



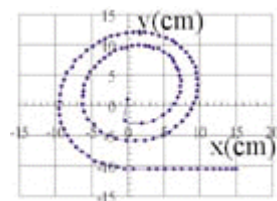
圖md-3 mn、mr同步通過座標軸對應圖

(四)磁力運動實驗結果（空氣－低壓對照）

空氣－低壓對照磁力運動是在低壓實驗櫃中進行的在實驗櫃尚未抽氣時首先進行mn空氣中磁力運動實驗，軌跡如右列圖mn-1。然後封閉操作孔進行抽氣，待櫃內壓力穩定後以操作桿釋放mn並進行低壓中mn磁力運動實驗，低壓中之mn軌跡如右圖mn-2。



圖mn-1 mn空氣中磁力運動軌跡圖



圖mn-2 mn低壓中磁力運動軌跡圖

六、討論

(一)磁力量測結果討論

「ma-M磁力-距離」關係如圖七。由圖七的對數坐標圖中量測曲線與斜率-2的直線比較，可明顯看出下列各點：

- 1.近距離部份相差不大，研判主要原因為量測觀察誤差。
- 2.中距離部份精度很好，可吻合磁力與距離平方成反比的關係。
- 3.遠距離部份的誤差就更大了，已趨近斜率-3。研判主要原因為受M另一磁極的影響及 ma 兩端磁力線迴路的影響。

已採取的改進方案為：

- 另行製作mn，增加 h：ro的比值以減低mn兩端磁力線迴路的影響；
- 增長M 的長度，將原來15個小圓柱磁鐵增加為30個，以減低M另一磁極的影響。

改進後的結果如圖八顯示：在此實驗範圍內，改善的效果良好。

(二)磁力運動實驗結果討論

- 1.橢圓形軌跡：

由圖ma-3、圖ma-4及圖ms-1至圖ms-3可以看出各圈軌跡都很近似於橢圓，查看ms的軌跡，可明顯看出ms已進入橢圓形軌

道、運動一圈又回到上一圈軌道上且重疊一段時間，但是因能量降低而迅速撞向M。但仔細觀察仍有一些使行星運動不完美的原因，討論說明如下：

- (1)磁力不足: 因而在遠距離時無法將 m 吸近，使得橢圓形近日點一端較寬，遠日點一端較窄。再者因遠距離磁力不足導致長軸變長使焦點更遠離中心，所以橢圓的焦點與M位置有一差距，如圖ma-4所示。（主星M和ms（ma）位置判讀皆以質心位置代表，但實際計算磁力距離是以M的外徑面到ms（ma）的外徑面，也就是說會與原來判讀的距離相差半徑 r_M ＋半徑 r_m ，若除去此一長度，則橢圓的焦點與M位置的差距將會更小）
- (2)空氣阻力: 使m的力學能損失而法平衡磁力產生的向心加速度，因此各圈軌跡有越來越小的趨勢終至被吸到M上。
- (3)徑方向磁力不均勻: 造成大區域軌跡線不圓滑，如 ma的軌跡就是如此。
- (4)錄影轉版及判讀誤差: 造成小區域軌跡線不圓滑，例如ms軌跡的扭曲就是如此形成的，尤其當取樣較密時更是嚴重-如圖 ms-1至圖ms-3取樣間隔為三十分之一秒，而圖ms-5取樣間隔為十分之一秒。

2.單位時間掃過面積：

- a.由ma及ms的軌跡均可以看出遠距離掃過面積較大，近距離掃過面積較小；
- b.由ma的軌跡亦可以看出大圈掃過面積較大，小圈掃過面積較小。其形成原因亦為空氣阻力及磁力不足。

3.軸長三次方與週期平方成正比：

其誤差形成主要原因還是空氣阻力及磁力足。值得注意的是：週期的變化並不大，但R越來越小，也就是說速度越來越慢，空氣阻力的影響也就更明顯。

(三)雙星運動結果討論

雖然結果並非十分理想，但仍可看出雙星運動的趨勢：第一 可由兩星經過兩軸的時間看出，它們的周期幾乎相等；第二 共同質心的變動量不多，可見它們是一同繞一定點做運動，此點即為此雙星系統的合成質心。本實驗僅採用了兩圈數據，其原因為：兩根吊線纏繞在一起，已看出明顯的誤差，故未採用第三圈以後的數據。

(四)磁力運動實驗結果討論（空氣－低壓對照）

此部分實驗所用的衛星磁鐵 mn 較輕，在空氣中進行運動特別易受空氣阻力影響，反之，空氣－低壓的對比也就格外明顯。從結果中不難看出，同一釋放點的 mn 衛星磁鐵，在低壓中可比在空氣中多繞一圈，代表的意義就是：運動中的衛星在低壓中受到較少的空氣阻力，使衛星的能量損失較少，故可運行較長路程而不會被吸入。「低壓中」實驗因吸塵器的吸力不足，實驗櫃中壓力僅降至59cm水銀柱，雖然離真空還有很大的距離但已經比「空氣中」實驗更接近太空中行星（衛星）的運動狀態。若能再進一步改善吸塵器吸力不足的問題，使壓力更低，相信一定有更好的結果。

七、結論

這個實驗已可在實驗範圍內局部驗證磁力-距離關係，也可趨近刻普勒定律的結果，雖然結果並不很準，但也找到改進之道。重要的是這個實驗所須要的主要器材都是一項一項用心構思逐一克服的；而一般器材如彈簧秤等也有它的奧妙--如何選用、如何量測及讀取結果... 都有它的技巧和學問。此外更為重要的是：實驗的設計及其中主要器材的構想靈感都來自生活中的事或物以及學校的課程與實驗，使我更深一層體會到物理的實用性及其奧妙與偉大！作這個實驗真的很辛苦，但是非常有趣好玩，收獲頗多，非常值得！

八、參考資料

- (一)普通物理學，編著者 葉阿真，丁友出版社印行
- (二)金屬材料，編著者 呂璞石、黃振賢，文京圖書公司

評語

本作品以同為平方反比形式的磁作用力來模擬萬有引力的構想，具有高創意性及可行性。研究目的清礎具體可行，所使用的實驗器材大部分自行設計製作。器材雖簡單，但實驗結果重複性高。以扇形柱磁塊組成軸心及圓柱表面具不同磁柱之衛星磁塊，構想新穎，且因套有鐵薄筒，可使磁場在柱表面均勻分佈，獲得較佳且穩定之磁作用力，相當具有創意及實用性。作者表達能力佳，操作生動，思慮周密，深具良好的科學態度。

[回到目錄頁../Index.htm](#)