

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 物理科

040105

磁力砲－磁力與能量的探討

學校名稱：國立虎尾高級中學

作者： 高二 呂達觀 高二 余承祐 高二 王紘澤	指導老師： 蘇裕年
---	------------------

關鍵詞：磁力砲、動能、碰撞

摘要

本實驗的目的是探討鋼球在磁鐵作用下的效應。本實驗利用「測量臺」與「射出端初速測量裝置」兩個實驗裝置，測量出磁力與距離關係、入射鋼球能量與射出鋼球能量之間的關係。我們以不同的顆數測出射出鋼球所擁有之能量，用不同的固定磁鐵方式比較其能量轉換差異。實驗結果顯示，在經過多組磁鐵加速裝置的實驗後，我們發現射出的鋼球每經過一組加速器，其能量便會等比例增加，這也說明了射出鋼球的能量是具有累加性的。

壹、研究動機：

我們曾經在學校的社團博覽會上看過科研社的「磁力砲」實驗演示，當時的裝置是以磁鐵的吸引力，將一邊的鋼球以極快的速度吸近，進而與磁鐵碰撞，讓另一端的鋼球以高速射出。當時的我們對於只是放一個小小的鋼球去撞擊磁鐵，卻可以讓磁鐵另一端的鋼球以極高的速度彈出的現象感到十分好奇。雖然在玩「磁力砲」的時候，我們已經知道與磁鐵相對距離愈遠的話，則磁力會愈微弱；但是當兩者相對靠近，尤其是在最後的一小段距離時，距離每接近一些，磁力便會有急劇上升的現象，但磁力與距離到底有著甚麼樣關係呢？而磁鐵與鋼球在極短的時間內，以極高的速度吸在一起，並把能量轉換給另一端的鋼球，使之彈出，為什麼磁鐵能讓鋼球有那麼大的彈出速度呢？.....這幾個我們所觀察到的現象與問題，讓我們對於「磁力砲」有更大的興趣，並希望能找出隱藏於其中的奧秘。

貳、研究目的：

- (一) 了解磁力與距離的關係，並推算出方程式。
- (二) 了解磁力與鋼球數間的關係。
- (三) 測出鋼球初速在有幾顆鋼球的時候會產生最大值，或是隨著鋼球數的增加而不斷增加並找出原因。
- (四) 了解入射鋼球的初速與射出鋼球的末速之間的關係。
- (五) 進一步利用實驗數據推測出鋼球運動期間能量的變化關係。
- (六) 在綜合所有的實驗數據後，檢查是否與理論值有較大的誤差，如果有，推測出可能原因。
- (七) 找出磁力砲在日常生活中的可能利用。

參、研究設備及器材：

- (一) 實驗器材（如圖 3-1）
 - 重物(固定鋼球於上) x1
 - 磁鐵 x15(圓柱狀，直徑 1cm，高度 1cm)
 - 鋼球 x40(直徑 0.95cm)
 - 水平儀 x1
 - 游標尺 x1(最小刻度 0.001 公分)
 - 鋼尺 x1(15 公分,最小刻度 0.05 公分)



圖 3-1 實驗器材

- (二) 實驗裝置：
 - 1. 自製磁力與距離關係測量臺 (如圖 3-2)：
 - 3 公斤磅秤 x1
 - 150 公克電子秤 x1

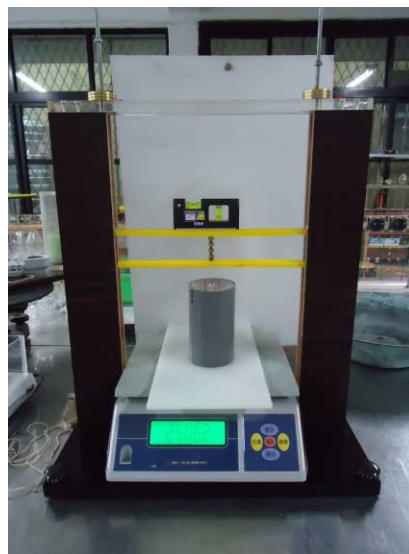


圖 3-2 磁力與距離關係測量臺

2. 自製射出端初速測量裝置
(如圖 3-3、3-4)：

多組磁鐵加速器 x1

卷尺 x4

測量鋼球落地的沙盤 x1

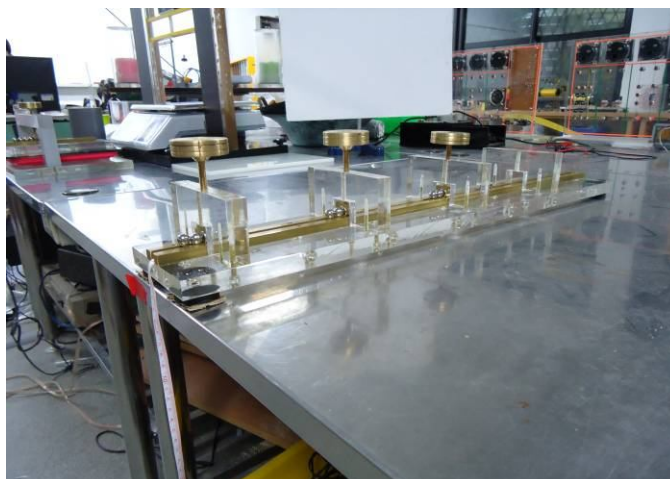


圖 3-3 射出端初速測量裝置



圖 3-4 測量鋼球落地的沙盤

肆、研究過程及方法：

實驗一、鋼球數量對拋出速率的影響

(一) 實驗目的：透過改變磁鐵一端放置不同的鋼球數，觀察其對磁鐵拋出速率的影響。

(二) 原理：

1. 從固定高度水平射出，由水平拋體公式計算出拋出時的速率及動能。

$$S = vt$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

S：水平位移 v：速度 t：時間 h：桌高 g：重力加速度

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

E_k ：動能 m：質量 v：速度

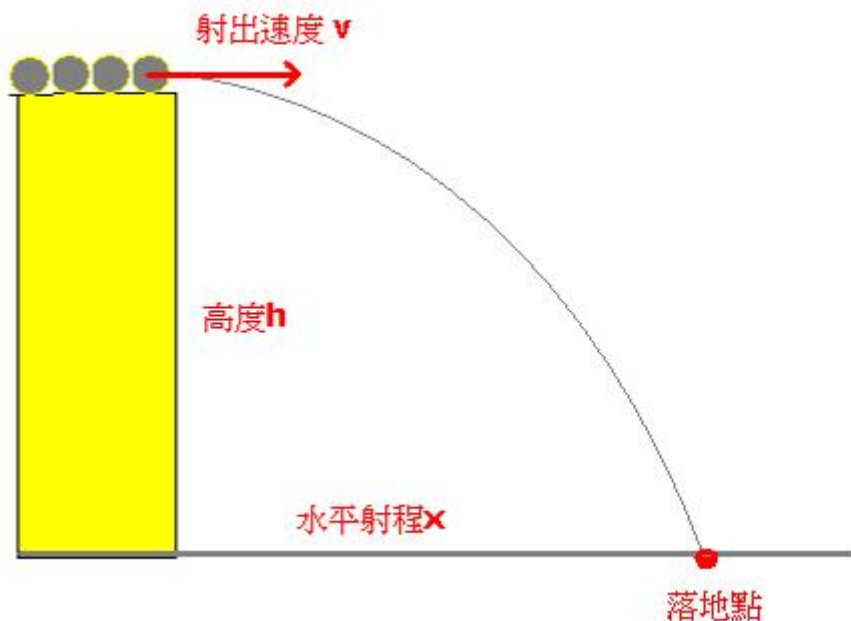
(三) 實驗步驟：

1. 將磁鐵固定在放置於一定高度的軌道上，以一個固定距離釋放初速為 0 的射入端鋼球。
2. 射出端鋼球射出後，鋼球會做水平拋體運動，而由於高度 h 已固定，所以可以計算出從射出到落於地面的時間，而我們使用沙坑來精確標定落到地面的位置，再利用捲尺測量此位置與拋射起點的直線距離 l ，

由畢氏定理：

$$x_{\text{水平距離}} = \sqrt{l^2 - h^2}$$

3. 水平距離搭配落下時間就可求出鋼球射出時的初速，由於鋼球質量已知，可進而求出動能。



(四) 實驗數據：

g 值	桌面高	落下時間	鋼球質量
9.8ms^{-2}	78.4cm	0.4s	3.500g

實驗 1-1 發射端放置 2 顆鋼球

次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	2.442	2.434	2.460	2.392	2.440	2.418	2.450	2.392	2.418	2.421	2.427
動能(mJ)	10.4	10.4	10.6	10.0	10.4	10.2	10.5	10.0	10.2	10.3	10.3

實驗 1-2 發射端放置 3 顆鋼球

次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	2.757	2.720	2.639	2.686	2.664	2.627	2.642	2.674	2.686	2.717	2.681
動能(mJ)	13.3	12.9	12.2	12.6	12.4	12.1	12.2	12.5	12.6	12.9	12.6

實驗 1-3 發射端放置 4 顆鋼球

次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	2.689	2.757	2.723	2.735	2.698	2.692	2.698	2.717	2.658	2.624	2.630
動能(mJ)	12.7	13.3	13.0	13.1	12.7	12.7	12.7	12.9	12.4	12.0	12.1

實驗 1-4 發射端放置 5 顆鋼球

次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	2.301	2.376	2.366	2.369	2.376	2.327	2.334	2.294	2.373	2.340	2.346
動能(mJ)	9.3	9.9	9.8	9.8	9.9	9.5	9.5	9.2	9.9	9.6	9.3

(五) 實驗結果：

1. 鋼球數量愈多，彈出的初速也就愈大，但增加的幅度逐漸趨緩。
2. 在 4 顆到 5 顆時出現大小變化不規律的現象，這是因為在 4 顆或 5 顆鋼球的實驗中，有最後兩顆球一起彈出的情形，但第二顆球隨即會被磁鐵吸回，因此無法量測第二顆球的速度與動能。
3. 因此 2-3 顆鋼球為本實驗之適當數量。

實驗二、磁鐵與鋼球的磁力與距離關係

（一）實驗目的：

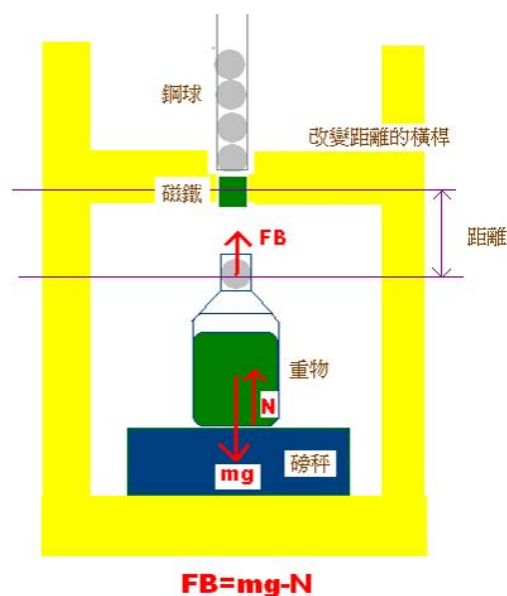
1. 使用自製的磁力量測裝置量測「磁鐵對待測鋼球的磁吸力」，並觀察其與「磁鐵另一端所吸附的鋼球數量」之關係，進而模擬鋼球被吸引而靠近磁鐵過程中，所受磁吸力隨距離的變化。
2. 改以磁鐵隔著不同數量的鋼球，吸附在同一端的鋼球，則可模擬鋼球被撞擊出去時，鋼球所需克服磁鐵對它的磁吸力隨距離變化的情況。
3. 透過實驗數據，擬出磁力隨距離變化的數學關係

（二）原理：

1. 靜磁庫倫定律：

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

依照此公式，兩磁體間的作用力大小與兩磁極強度 q 乘積成正比，與距離 d 的平方成反比。



（三）實驗步驟：

1. 將磁鐵固定在一個可調整高度的橫桿(利用微調螺絲的螺距來進行測量,最小單位可達 0.021mm),在磁鐵的上端放置吸附的鋼球，下端放置附有鋼球的重物（即磁力測量端）。
2. 藉由測量重量的損失量，就可求出在各個距離時的磁吸力量值。

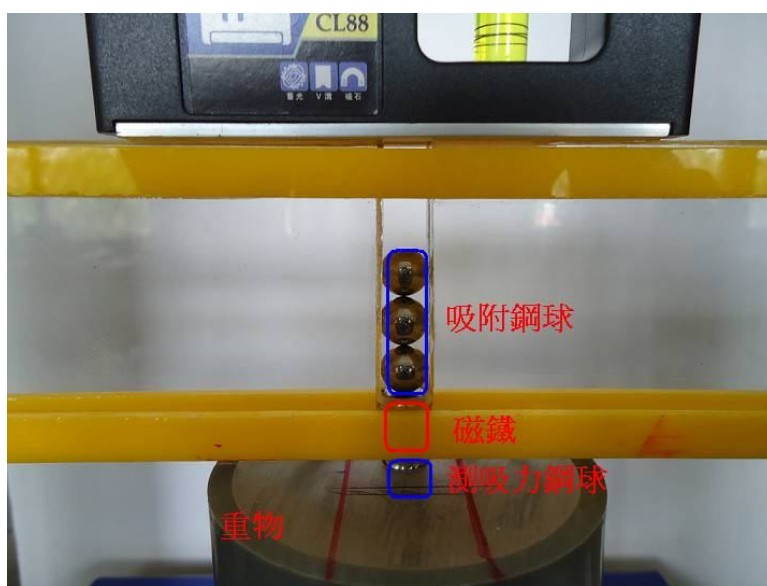


圖 4-1 磁力與距離測量裝置

- 量測球心與磁鐵中心之距離，作為距離之代表值。
- 利用相同的實驗裝置，但在磁鐵下端與待測鋼球之間加入數顆鋼球隔開，同樣測量其磁力隨距離變化的關係圖。

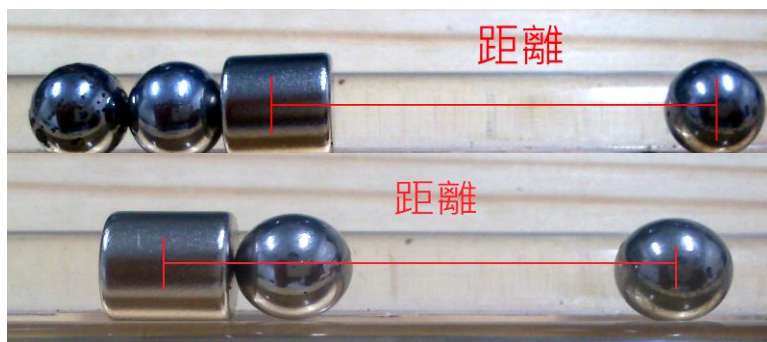


圖 4-2 ~4-3 距離量測基準

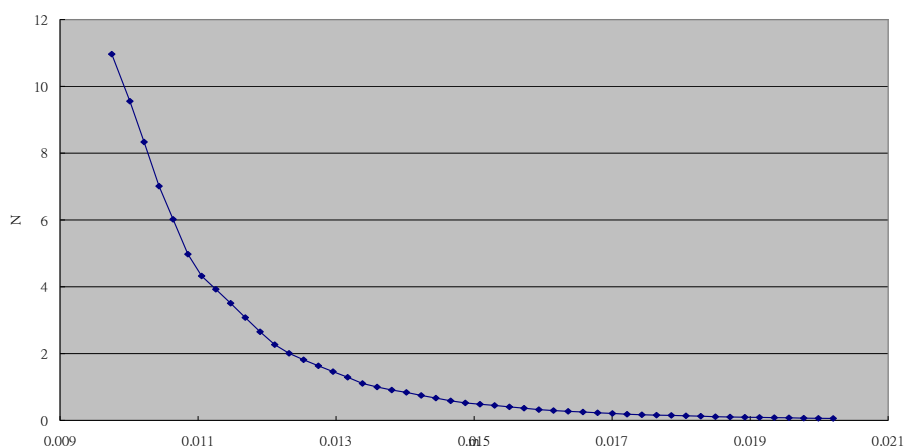
- 在測量時，我們發現磅秤因重物重量的改變而有測量台面的上升或下降，此變因對距離測量的判讀影響很大，因此我們求出磅秤彈性係數的方式來對距離進行修正。

(四) 實驗數據：

實驗 2-1 磁鐵一端吸 2 顆鋼球，另一端對待測鋼球的磁吸力與距離的關係

距離(m)	0.0098	0.0102	0.0103	0.0104	0.0106	0.0109	0.0111	0.0113	0.0115	0.0117
磁力(N)	11.100	7.762	6.291	5.555	4.913	4.194	3.490	2.872	2.491	2.294
距離(m)	0.0119	0.0121	0.0123	0.0125	0.0127	0.0130	0.0132	0.0134	0.0136	0.0138
磁力(N)	2.100	1.830	1.585	1.335	1.171	1.095	1.001	0.904	0.789	0.682

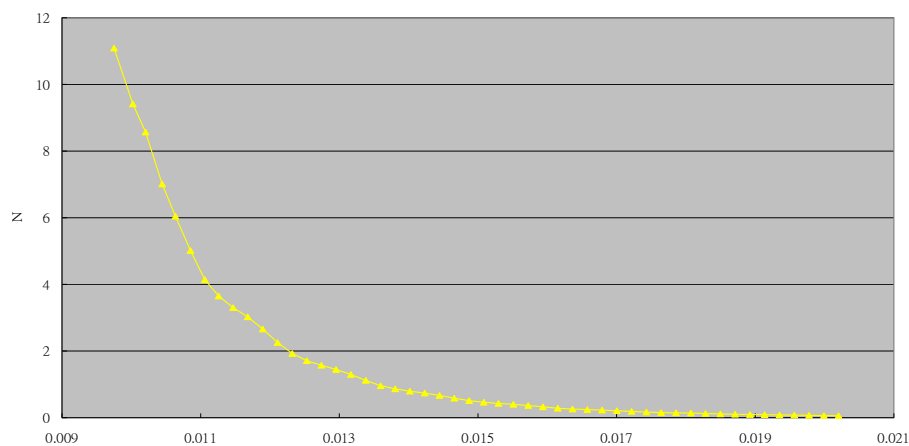
註：因資料點數量眾多，表格僅呈現部分數據，未表列的數據實際計算時仍會使用，此後之他種磁吸力與距離關係實驗也採此方式



圖表 4-2-1 磁鐵一端吸 2 顆鋼球，另一端對待測鋼球的磁吸力與距離的關係圖

實驗 2-2 磁鐵一端吸 3 顆鋼球，另一端對待測鋼球的磁吸力與距離的關係

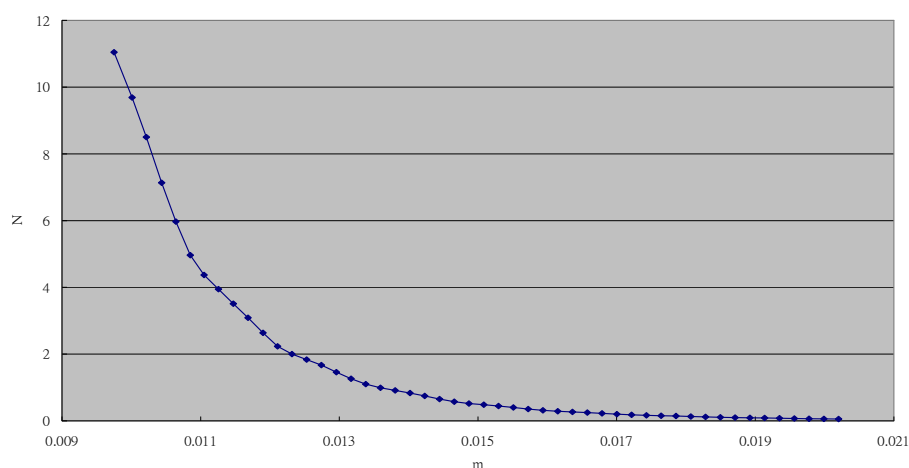
距離(m)	0.0098	0.0100	0.0102	0.0105	0.0106	0.0108	0.0110	0.0113	0.0115	0.0117
磁力(N)	11.100	9.752	8.721	6.072	5.018	4.378	3.986	3.602	3.120	2.707
距離(m)	0.0119	0.0121	0.0123	0.0125	0.0127	0.0130	0.0132	0.0134	0.0136	0.0138
磁力(N)	2.300	2.034	1.870	1.700	1.506	1.311	1.131	1.015	0.937	0.865



圖表 4-2-2 磁鐵一端吸 3 顆鋼球，另一端對待測鋼球的磁吸力與距離的關係圖

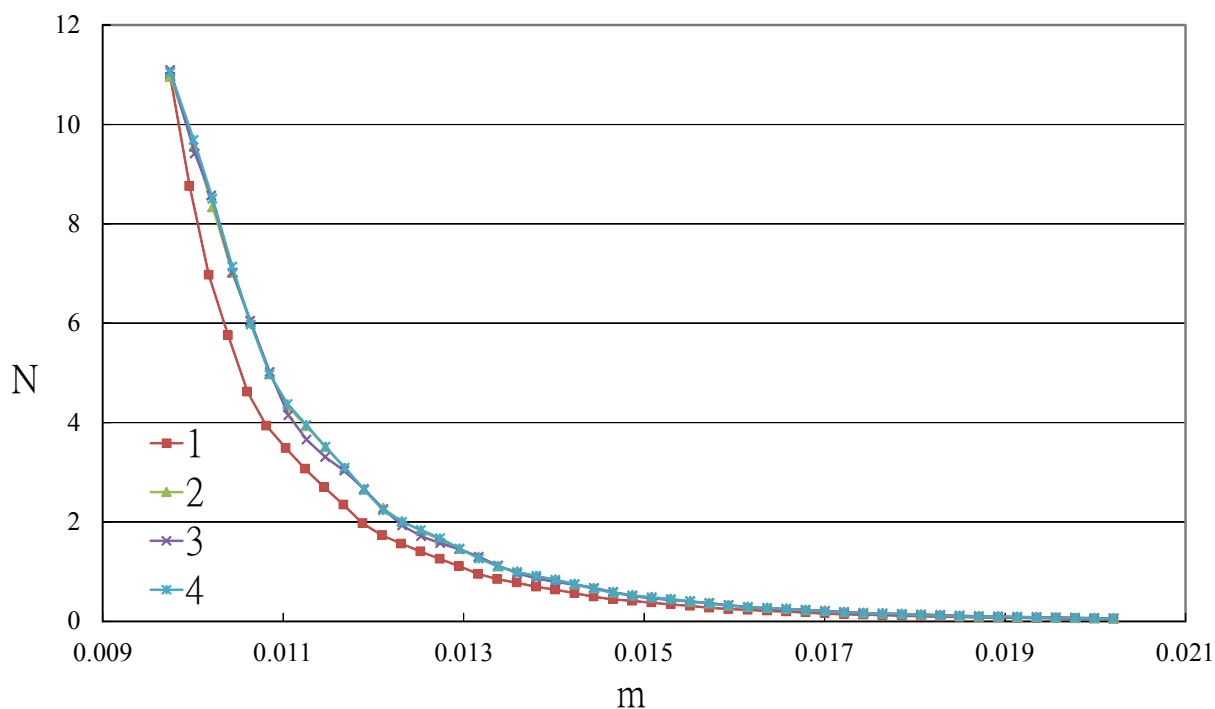
實驗 2-3 磁鐵一端吸 4 顆鋼球，另一端對待測鋼球的磁吸力與距離的關係

距離(m)	0.0098	0.0100	0.0102	0.0104	0.0106	0.0109	0.0111	0.0113	0.0115	0.0117
磁力(N)	11.047	9.687	8.502	7.134	5.969	4.965	4.370	3.947	3.509	3.089
距離(m)	0.0119	0.0121	0.0123	0.0125	0.0127	0.0130	0.0132	0.0134	0.0136	0.0138
磁力(N)	2.63914	2.23146	2.00018	1.83456	1.66992	1.4602	1.26028	1.10152	0.9898	0.9114



圖表 4-2-3 磁鐵一端吸 4 顆鋼球，另一端對待測鋼球的磁吸力與距離的關係圖

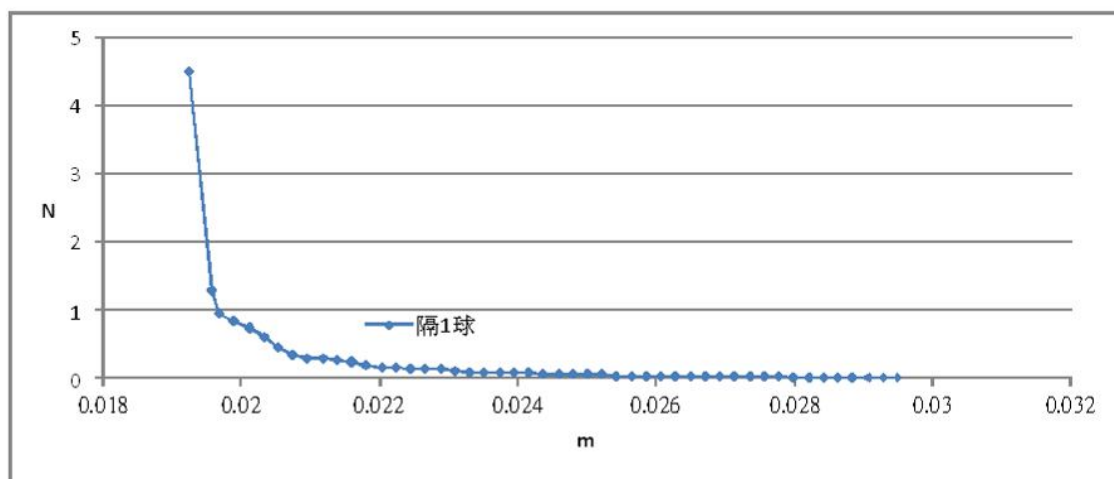
實驗 2-4 將四條曲線進行比對(另外加入了放 1 顆鋼球時之數據同時比較)



圖表 4-2-4 磁鐵一端吸附不同數量的鋼球，另一端對待測鋼球磁吸力與距離的關係圖

實驗 2-5 磁鐵與待測鋼球間隔一顆鋼球

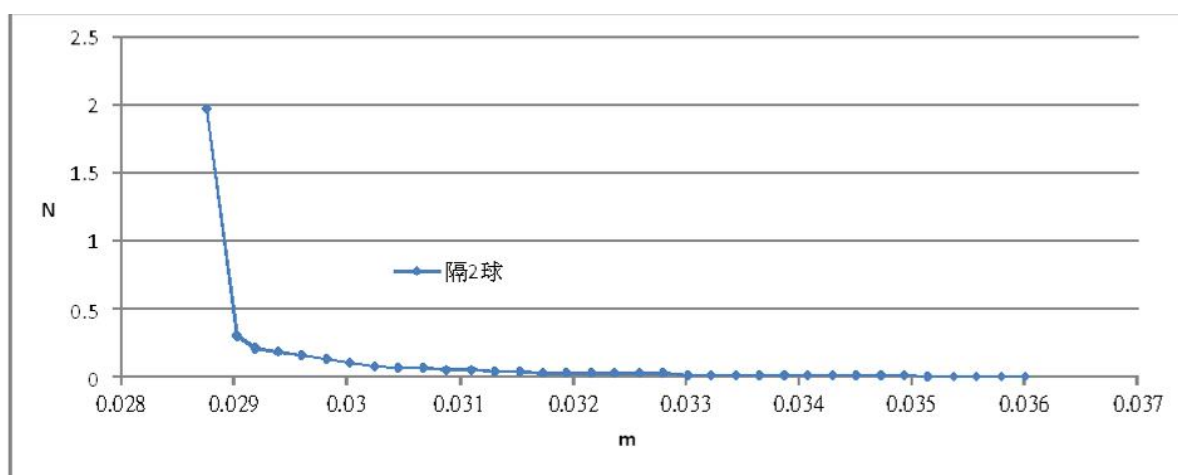
距離(m)	0.01925	0.01957	0.01969	0.01989	0.02011	0.02032	0.02054	0.02075	0.02096	0.02117
磁力(N)	4.5109	1.3044	0.9633	0.8555	0.7370	0.6037	0.4469	0.3459	0.3077	0.2911
距離(m)	0.02138	0.02160	0.02181	0.02202	0.02224	0.02245	0.02266	0.02288	0.02309	0.02330
磁力(N)	0.2715	0.2391	0.2009	0.1686	0.1539	0.1490	0.1411	0.1294	0.1117	0.0960



圖表 4-2-5 磁鐵與待測鋼球間隔 1 顆鋼球的磁吸力與距離的關係圖

實驗 2-6 磁鐵與待測鋼球間隔二顆鋼球

距離(m)	0.02875	0.02902	0.02918	0.02939	0.02960	0.02982	0.03003	0.03024	0.03046	0.03067
磁力(N)	1.9757	0.3107	0.2127	0.1891	0.1676	0.1372	0.1049	0.0823	0.0706	0.0666
距離(m)	0.03088	0.03110	0.03131	0.03152	0.03174	0.03195	0.03216	0.03238	0.03259	...(略)
磁力(N)	0.0627	0.0578	0.0480	0.0412	0.0363	0.0343	0.0333	0.0304	0.0265	...(略)



圖表 4-2-6 磁鐵與待測鋼球間隔 2 顆鋼球的磁吸力與距離的關係圖

(五) 討論：

1. 大致來說，離磁鐵越近，磁鐵對鋼球的吸引力越強，且變化率隨著距離的拉近而急遽增加。
2. 在實驗 2-1 到 2-4 中，不論磁鐵吸附幾顆鋼球，曲線均大致吻合，在巨觀下觀察與鋼球數量多寡並無產生明顯差別，惟為在微觀下求得精確的數據，我們「於下個實驗磁力隨距離變化圖與動能之關係」，仍分別求得數據來分析。
3. 在實驗 2-5 與 2-6 中，磁力對距離的變化趨勢與實驗 2-1 到 2-4 有幾分類似，鋼球是磁性材料，強力磁鐵的磁性可將其磁化，隔 1 顆球(距離 0.01925m)時其最強磁力可達 4.5109(N)，隔 2 顆球(距離 0.02875m)時其最強磁力可達 1.9757 (N)。
4. 由於加入了幾顆鋼球隔開，導致與磁鐵與鋼球的直線距離大為增加，磁力與實驗 2-1 到 2-4 相比，顯得相對小了许多。

(六) 磁力隨距離變化圖與動能之關係

1. 透過以上的實驗，我們可以得知磁力是距離的函數，而且會隨著距離的增加而快速減少，但我們發現此曲線與 2 次函數的曲線相差甚大，無法建立關係式，我們推測此作用力之大小應與距離的某個次方成反比。

即 $F(x) = k * x^N$ 透過「取對數後線性回歸」的方式可以得到一條近似的曲線：

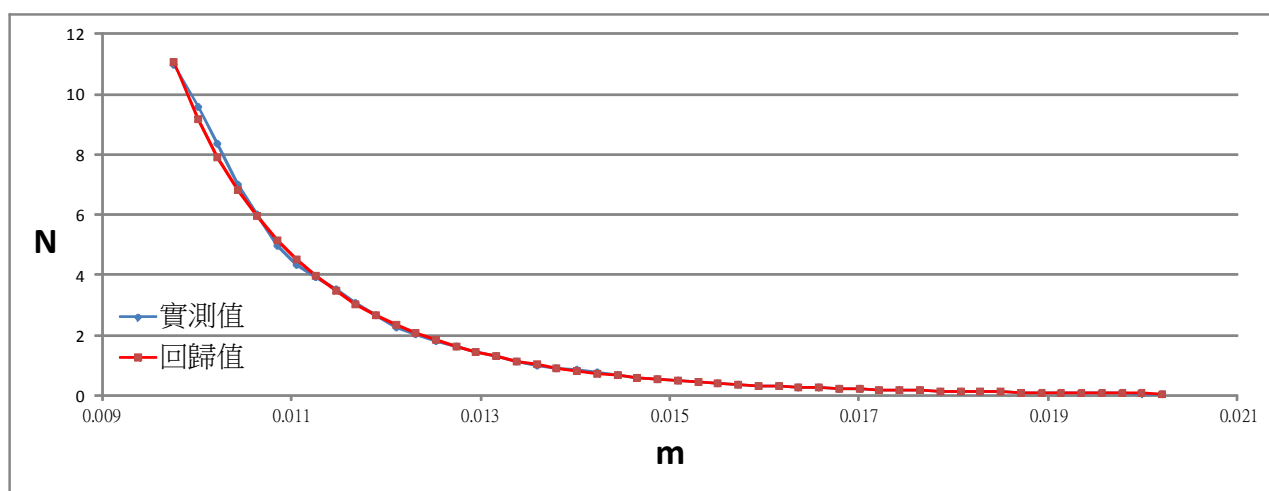
$$F(x) = k * x^N$$

$$\log F(x) = \log k + N * \log x$$

透過求取 $\log F(x)$ 對 $\log x$ 的回歸直線，可以得知 N 值以及常數 k

(1) 磁鐵一端放 2 顆鋼球，另一端之磁力與距離之函數為

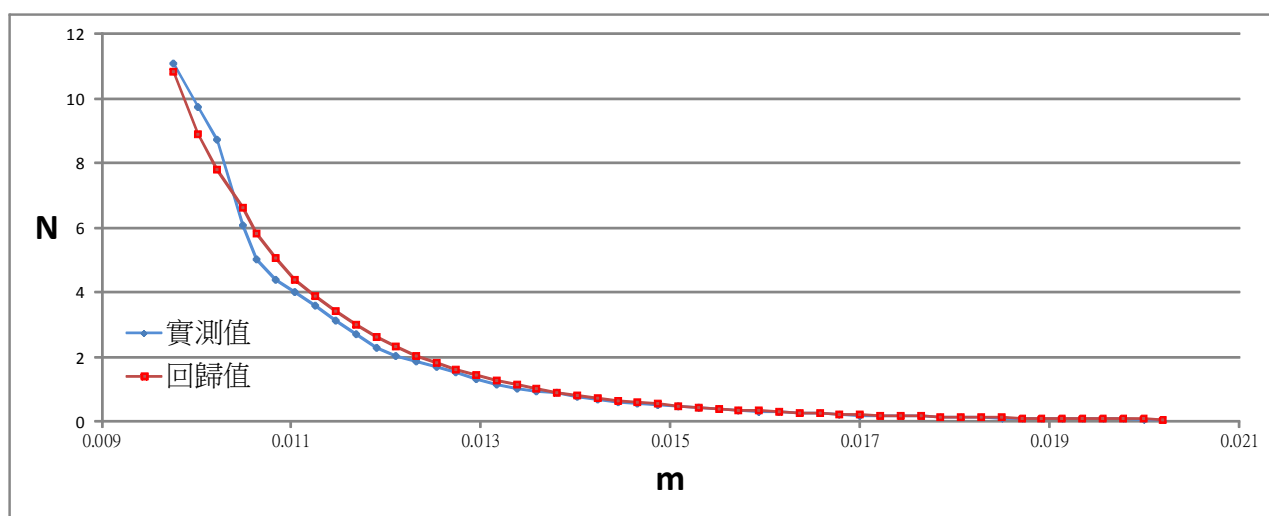
$$F(x) = 4.368 * 10^{-14} * x^{-7.163}$$



圖表 4-2-7 實驗 2-1 之實際測量值與回歸值對照圖

(2) 磁鐵一端放 3 顆鋼球，另一端之磁力與距離之函數為

$$F(x) = 4.757 * 10^{-14} * x^{-7.140}$$



圖表 4-2-7 實驗 2-2 之實際測量值與回歸值對照圖

2. 我們發現磁力與距離的關係並非與距離 2 次方成反比，而是約略與距離的 7 次方成反比，此點將在附錄說明。
3. 由於 $F-X$ 圖曲線下方所圍成之面積（ $E = F * X$ E :能量 F :磁力 X :兩者距離）可代表外力所作之功，即物體所獲得的能量，因此藉由推算出磁力與距離的參考關係式，我們利用積分的方式計算曲線下的面積，進而得知在鋼球逐漸被磁鐵吸引而靠近過程中能量的變化。

(1) 2 顆鋼球的情形

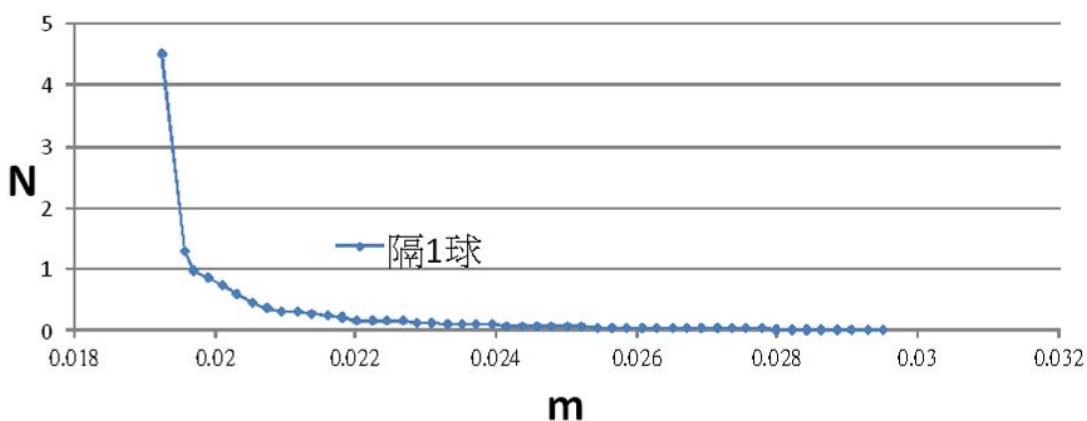
$$\int_{0.00975}^{\infty} 4.368 * 10^{-14} * x^{-7.163} d(x) \approx 0.0175$$

經計算後能量約為 0.0175J，為鋼球在接近磁鐵的過程中磁鐵磁力對鋼球的磁吸作用所釋放出的能量（即鋼球對磁鐵其磁力位能的損失量）。而這能量必須再減掉磁鐵另一端鋼球脫離磁鐵磁力場所所需的能量（即隔 1 顆鋼球之函數曲線下面積），求出來的值即是鋼球脫離磁鐵後理應獲得的動能。

由於在實驗 2-5 與 2-6 中，被磁鐵吸住的鋼球亦會被磁化，由待測端之鋼球觀之，該兩者當屬為單一磁體，但由於其並非規則形狀的磁體，難以線性逼近估計出以「距離為變數的函數圖形」（因無法決定磁體中心），只能先以梯形面積作為曲線下的面積之估計值，求出此值所需之數據由實驗 2-5 與 2-6 可得知。



磁鐵與鋼球間相隔 1 顆鋼球時之磁力與距離變化關係（即實驗 2-5）：



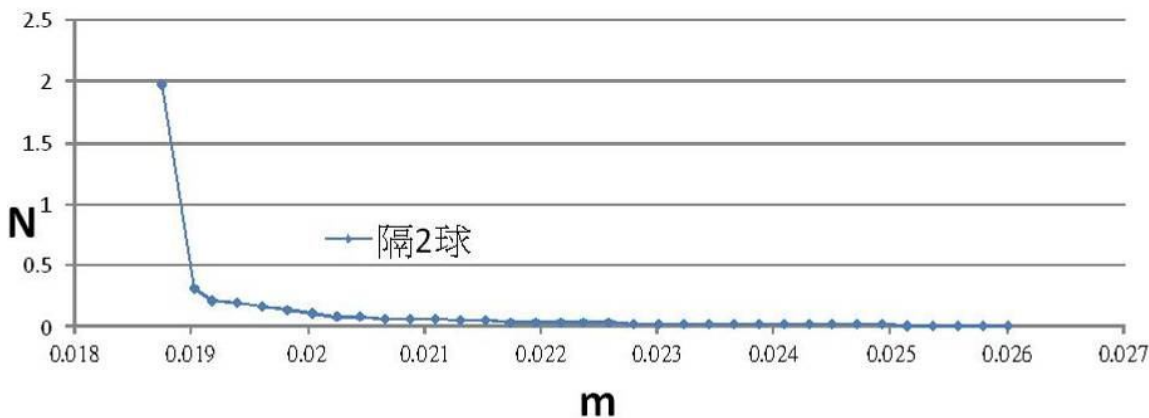
求出之面積值約為 0.00253(J)，為鋼球接近而被吸附所釋放之位能與另一端第 2 顆鋼球彈出所需之動能的能量差，假設位能全部轉換為動能，即為第 2 顆鋼球彈出時所應具有之動能 $0.0175 - 0.00253 \div 0.01497(\text{J})$ ，
實際動能/理論動能的百分比 $0.0103/0.01497 \times 100\% = 68.8\%$ 。

(2) 3 顆鋼球的情形

$$\int_{0.00975}^{\infty} 4.757 * 10^{-14} * x^{-7.140} d(x) \approx 0.0172$$

同理，亦以梯形面積做為此組實驗中脫離時增加之位能（損失的動能）之估計，此值約為 0.00067(J)，即為鋼球接近而被吸附所釋放之位能與另一端第 3 顆鋼球彈出所需動能的能量差，假設位能全部轉換為動能，即為第 3 顆鋼球彈出時所應具有之動能 $0.0172 - 0.00067 \div 0.01653(\text{J})$ ，
實際動能/理論動能的百分比 $0.0126/0.01653 \times 100\% = 76.225\%$ 。

磁鐵與鋼球間相隔 2 顆鋼球時之磁力與距離變化關係（即實驗 2-6）：



實驗三、放置多組磁鐵加速器之速度與動能

（一）實驗目的：

由於透過改進實驗方式對結果影響程度有限，因此我們推測器材本身有其極限，無法將能量完全轉移，為了解能量轉移或消耗可能的模式，我們設計了以下的實驗。

（二）原理：

我們從之前的實驗過程中發現，碰撞並非僅發生在入射鋼球與磁鐵之間，而是整個系統發生連續的碰撞而將能量傳遞下去，而由於磁鐵與鋼球之形狀、質量均不同，故無法將其簡化為質點間的彈性碰撞，能量也並非以 100% 的比率由入射鋼球轉換至出射鋼球。

我們假設每通過一組磁鐵，入射球原先的動能（當其初速不為零）與因靠近磁鐵過程中損失位能所轉換的動能之和即為入射鋼球所輸入的能量，此能量先乘以一固定的轉移比例 r 之後，再扣掉出射球被磁鐵所吸回之力所損失的能量，即是出射球最後所獲得的動能。

假設能量轉移的比例為 r ，則：

$$E_3 = (E_0 + E_1) * r - E_2$$

E_0 ：鋼球原本的動能

E_1 ：接近磁鐵過程中，因磁力位能損失增加的動能

E_2 ：射出後，受到磁鐵吸回損失的動能

E_3 ：射出後的末動能

（三）實驗步驟

1. 將數組磁鐵以 N S 極相間的方式固定在軌道上，兩者相隔一段足夠遠的距離（約 10 公分），使各組磁鐵間彼此不會互相干擾。
2. 在第一組磁鐵加速器前一定距離處釋放初速為 0 的射入端鋼球。
3. 利用實驗一的方式，量測拋射距離後換算速率及動能。

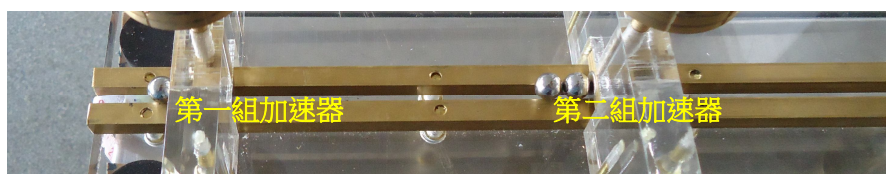


圖 4-4 射出端初速測量裝置

（四）實驗數據

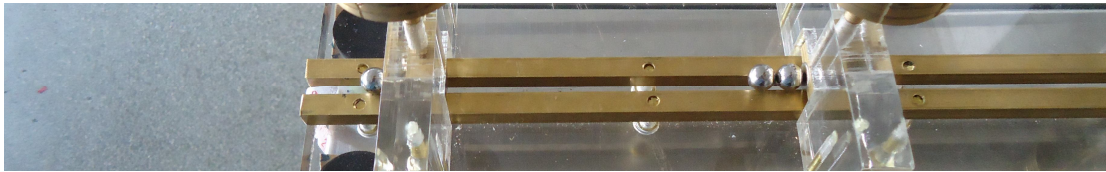
實驗 4-1 放置 1 組磁鐵，每組 2 顆鋼球。（即實驗 3-1）



次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	2.442	2.434	2.460	2.392	2.440	2.418	2.450	2.392	2.418	2.421	2.427
動能(mJ)	10.4	10.4	10.6	10.0	10.4	10.2	10.5	10.0	10.2	10.3	10.3

計算得 $r_{12} = \frac{0.0103 + 0.0025}{0 + 0.0175} \approx 0.731$

實驗 4-2 放置 2 組磁鐵，每組 2 顆鋼球。



次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	3.122	3.126	3.082	3.014	3.014	2.990	3.026	2.936	2.954	2.975	3.122
動能(mJ)	17.1	17.1	16.6	15.9	15.9	15.6	16.0	15.1	15.3	15.5	16.0

計算得 $r_{22} = \frac{0.016 + 0.0025}{0.0103 + 0.0175} \approx 0.687$

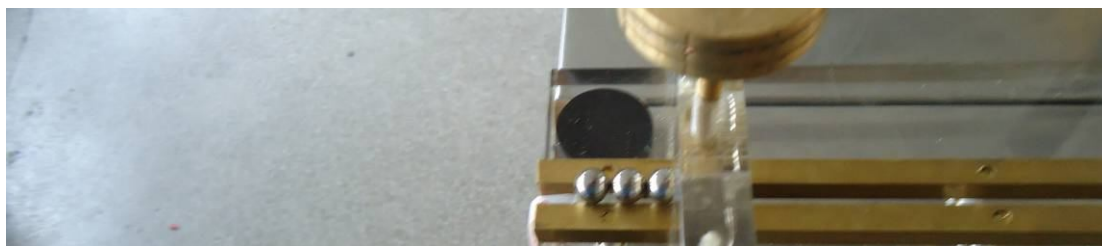
實驗 4-3 放置 3 組磁鐵，每組 2 顆鋼球。



次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	3.444	3.587	3.415	3.544	3.516	3.458	3.678	3.372	3.573	3.372	3.496
動能(mJ)	20.8	22.5	20.4	22.0	21.6	20.9	23.7	19.9	22.3	19.9	21.4

計算得 $r_{32} = \frac{0.0214 + 0.0025}{0.016 + 0.0175} \approx 0.713$

實驗 4-4 放置 1 組磁鐵，每組 3 顆鋼球。(即實驗 3-2)



次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	2.757	2.720	2.639	2.686	2.664	2.627	2.642	2.674	2.686	2.717	2.681
動能(mJ)	13.3	12.9	12.2	12.6	12.4	12.1	12.2	12.5	12.6	12.9	12.6

計算得 $r_{13} = \frac{0.0126 + 0.0007}{0 + 0.0172} \approx 0.773$

實驗 4-5 放置 2 組磁鐵，每組 3 顆鋼球。



次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	3.171	3.226	3.220	3.270	3.203	3.285	3.290	3.406	3.317	3.349	3.274
動能(mJ)	17.6	18.2	18.1	18.7	18.0	18.9	18.9	20.3	19.3	19.6	18.8

計算得 $r_{23} = \frac{0.0188 + 0.0007}{0.0126 + 0.0172} \approx 0.654$

實驗 4-6 放置 3 組磁鐵，每組 3 顆鋼球。



次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
拋出初速(m/s)	3.813	3.855	3.967	3.897	3.995	3.990	3.858	3.853	3.886	3.878	3.899
動能(mJ)	25.4	26.0	27.5	26.6	27.9	27.9	26.0	26.0	26.4	26.3	26.6

計算得 $r_{33} = \frac{0.0266 + 0.0007}{0.0188 + 0.0172} \approx 0.758$

整理前述實驗結果：

動能(mJ)	1 組磁鐵	2 組磁鐵	3 組磁鐵		r_{1n}	r_{2n}	r_{3n}	平均
2 顆鋼球	10.3	16.0	21.4	n=2(2 顆鋼球)	0.731	0.687	0.713	0.710
3 顆鋼球	12.6	18.8	26.6	n=3(3 顆鋼球)	0.773	0.654	0.758	0.728

(五) 討論

1. 能量隨著放置加速器數量增加而提升，但兩者並非正比關係，也非等差增加，且增加幅度愈來愈小。
2. 將實驗數據帶入我們假設的模型，在相同鋼球數下，不論放置的磁鐵組數多寡，算出的 r 值均大致相等，證明我們的模型是可靠的。
3. 此結果說明了能量具有累加性，但由於能量會以某個比例損耗，因此無法無限制的隨著放置磁鐵數量而增加。
4. 依照我們所求出的 r 值取平均，再套進我們前面的模型來試算此種加速器所能加速的極限，我們發現：

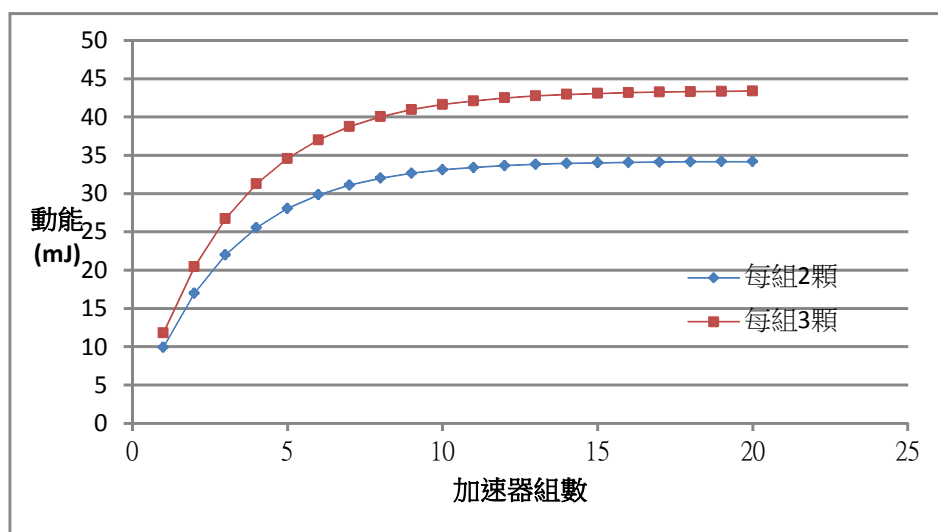
每組放 2 顆鋼球

組數	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
能量(mJ)	0	9.9	17.0	22.0	25.5	28.0	29.8	31.1	32.0	32.7	33.1
組數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
能量(mJ)	33.4	33.7	33.8	33.9	34.0	34.1	34.1	34.2	34.2	34.2	

每組放 3 顆鋼球

組數	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
能量(mJ)	0	11.8	20.4	26.7	31.3	34.6	37.0	38.8	40.0	41.0	41.6
組數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
能量(mJ)	42.1	42.5	42.8	43.0	43.1	43.2	43.3	43.3	43.4	43.4	

將結果作圖如下，可以發現到在 18 組後的能量增加幅度幾乎為零，已無明顯變化。（而此時對應鋼球的末速各約為 4.42 m/s 及 4.97 m/s）



圖表 4-4-1 加速器數量與射出鋼球動能關係圖

5. 由我們的實驗結果及以上的試算可以得知，在能量損失率高達 30%的情況下，是無法用此種設備做出有實用價值的加速器的。

伍、結論：

（一）研究結果整理：

1. 實驗一時，剛開始彈出速度與距離會隨著射出端的鋼球數增加而增加，但在超過三顆鋼球後，其增加幅度卻趨近於零。
2. 在實驗二中，我們測出了磁力與距離的關係，並線性逼近出了兩者的關係式，約是與距離的 7 次方成反比，並利用功能原理，推算出鋼球在接近過程中所損失的磁力位能。
3. 然而，我們並未能求出在相隔一至兩顆鋼球的前提下，磁力對距離的明確關係式，但仍可透過計算曲線下面積得知被擊出鋼球脫離磁場所損失的動能，兩者相減即是僅考慮磁力作用下，被擊出鋼球所應獲得的動能。
4. 在實驗三，我們建立了能量損失的模型，並且透過實驗證實我們的想法為正確，依照實驗結果，大概只有 60%到 70%的輸入能量轉換為動能或位能的形式存在，而其他的能量則透過撞擊及摩擦被轉換為聲音或熱了。
5. 我們利用實驗三的數據對更多組加速器的情形進行試算，發現一開始的幾組動能有明顯增加，但幅度漸減，到了 18 組之後，能量的增加已經微乎其微，因此，這種加速裝置很難有實際的用途。
6. 我們發現磁鐵固定的鬆緊程度會影響射出鋼球的距離。當磁鐵固定的若即若離時，射出鋼球的距離會最遠，磁鐵固定的太緊或者是沒有固定時，射出鋼球的距離反而會減小。

（二）誤差探討：

1. 我們發現，在實驗一時，超過三顆鋼球後，其增加幅度會趨近於零，這是因為在做四顆鋼球跟五顆鋼球的實驗時，射出端已會發生第二顆鋼球也同時射出的現象，所以有部分的動能被轉移到了第二顆鋼球上，但第二顆鋼球因動能不夠大而被磁鐵吸回，因此我們無法求出該鋼球所獲得的動能，無法得知總動能與其增加的幅度。
2. 在實驗二中，因為測量距離的工具精度不夠，以致於產生誤差，在距離極小時，距離稍加改變磁力即有極大變化，所以此誤差對於實驗結果有一定程度的影響。

3. 由於實驗用鋼球之直徑為 0.95cm，但是我們所使用的圓柱狀強力磁鐵直徑為 1cm，若將兩者平置在軌道上，高度會有微小的差異，因而撞擊點將無法保持在正中央，加上兩者在形狀與質量均不同，故無法將能量完全轉移，這也是誤差的來源。
4. 即使我們花了許多時間來調整固定方式，動能轉換率仍然沒辦法超過 8 成，這是因為在巨觀世界中幾乎不存在所謂的完全彈性碰撞，總會有部分的能量轉為聲音或熱，加上固定磁鐵的裝置本身也會吸收部分的能量，這是難以避免的狀況。

陸、附錄

(一) 磁力與距離的關係

在實驗二中，我們做出來的實驗結果與一般所認知的平方反比定律並不相同，經過查閱資料後，靜磁庫倫定律是適用在假設磁單極存在的情形下，或兩磁鐵間的距離遠大於各磁鐵的 N 極與 S 極的距離時，兩個磁體間的吸引力與距離平方成反比，但目前為止，在自然界中並沒有發現磁單極的存在，而我們目前的磁鐵距離也並非遠大於磁極間的距離，因此這個理論並不適用我們做實驗的條件。

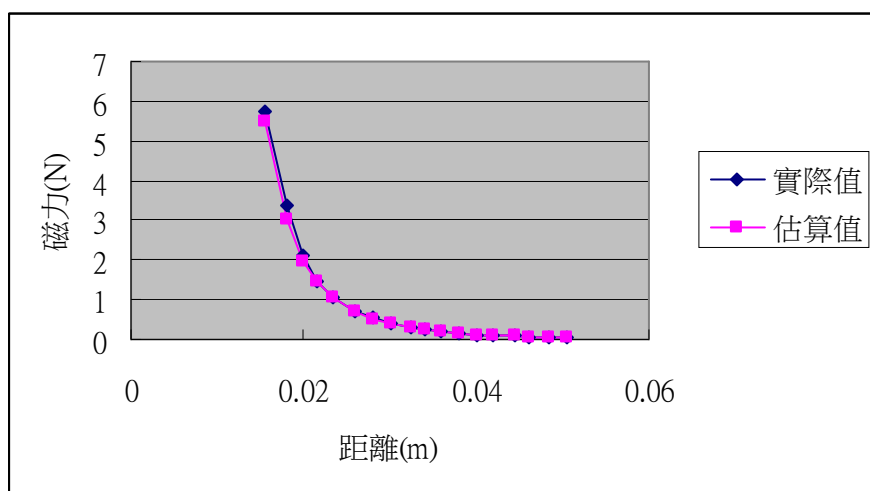
而我們所找到的國外實驗報告顯示，鋼球的被磁化程度與磁場強度成正比，而磁場的強度與距離是呈現 3 次方反比的關係，至於兩個磁鐵間的磁力與距離的關係則是呈 4 次方反比，我們額外做了一個實驗確認此項結果（我們實際測出的值如下表列），將兩者結合之後就可以知道鋼球與磁鐵間的磁力與距離關係是 7 次方反比，這個結果跟我們在實驗二計算出來的磁力與距離方程式是吻合的。

兩顆磁鐵間的磁力與距離關係：

距離(m)	0.034	0.0325	0.03	0.028	0.026	0.0235	0.0215	0.02	0.018	0.0155
實際磁力(N)	0.231	0.291	0.393	0.534	0.707	1.054	1.468	2.117	3.356	5.729
估計磁力(N)	0.238	0.284	0.392	0.516	0.695	1.041	1.485	1.984	3.024	5.499

估算磁力方程式：

$$\text{磁力(N)} = 3.174 \times 10^{-7} \times \text{距離(m)}^{-4}$$



柒、參考文獻：

1. 林明瑞。民 97。高級中學物理（下冊）。第八章：功與動能
2. 林明瑞。民 97。高級中學物理（下冊）。第九章：位能與能量守恆定律
3. 林明瑞。民 97。高級中學物理（下冊）。第十章：碰撞
4. 高斯來福槍 :: 國立中央大學物理演示實驗 (2007)
<http://demo.phy.tw/experiments/electromagnetics/gauss-rifle/>
5. Optimize your gauss rifle made from magnets and steel balls (2007)
<http://www.metamorphosite.com/increase-gauss-rifle-speed>
6. Magnetic model of alpha particle scattering (2011)
<http://www.nuffieldfoundation.org/practical-physics/magnetic-model-alpha-particle-scattering>
7. The Force between Two Magnets as a Function of Distance(2003)
<http://isaac.exploratorium.edu/~pauld/activities/magnetism/forcebetweenmagnets.html>
8. The Magnetic Cannon(2009)
http://www.ucke.de/christian/physik/ftp/lectures/Magnetic_Cannon.pdf
9. Energy and Momentum in the Gauss Accelerator, David Kagan, Phys. Teach. 42, 24 (2004)
<http://phys.csuchico.edu/kagan/profdev/GaussAccelerator.pdf>

【評語】 040105

1. 本研究是十分優良的教學示範。
2. 器材製作精良。
3. 磁鐵被碰撞部分能量被座台吸收，沒有善加記錄分析。
4. 可針對其中一項深入探討，如磁力作功，或是磁鐵受碰撞磁力減弱等。