中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 理化科

最佳團隊合作獎

031608

非理想狀態下 Newton's CRADLE(牛頓擺)能量傳遞與單擺週期的探討

臺北縣立福營國民中學

作者姓名：
國二 鄭期元 國二 李偉綸 國二 沈柏言
國二 潘宗霖

指導老師：
鄭守成 賴彥書

中華民國第 45 屆中小學科學展覽會作品說明書

科　　別：理化科

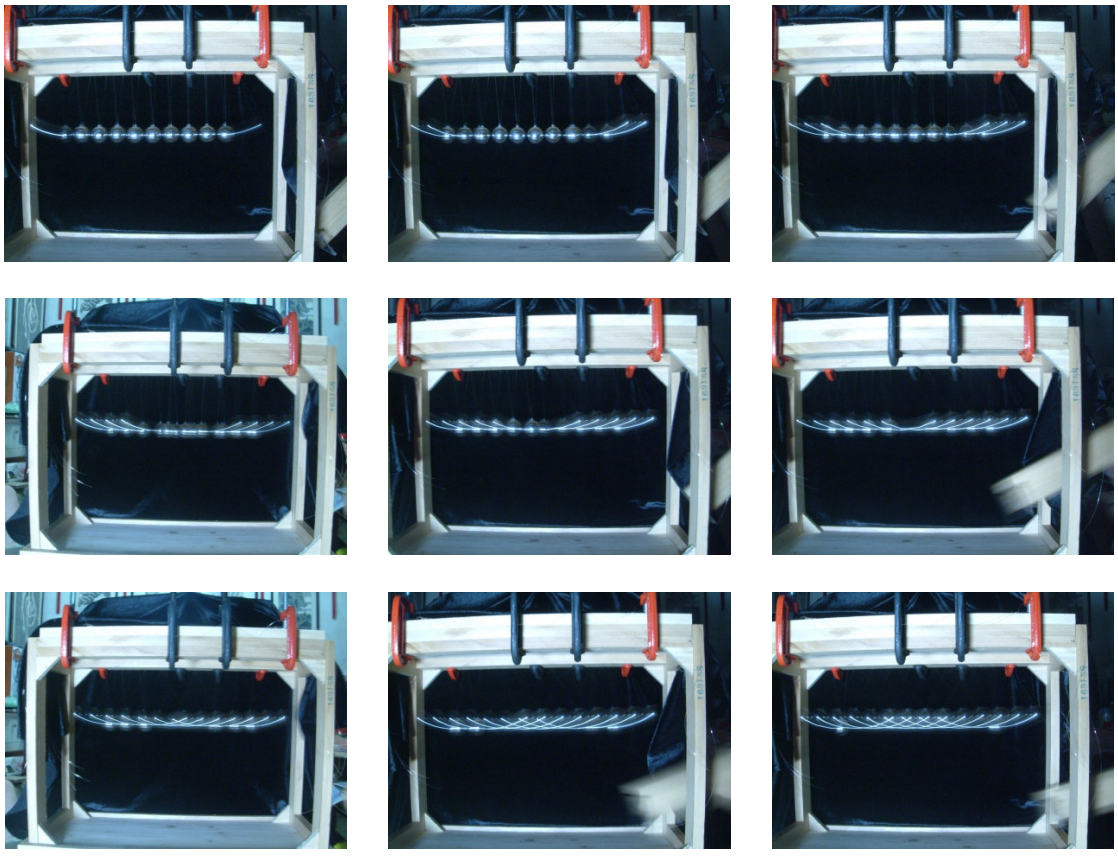
組　　別：國中組

作品名稱：**非理想狀態下 NEWTON's CRADLE(牛頓擺)**

能量傳遞與單擺週期的探討

關 鍵 辭：NEWTON's CRADLE、牛頓擺、單擺

編　　號：



目錄：

摘要 ---------- 第 1 頁

壹、研究動機 ---------- 第 1 頁

貳、研究目的 ---------- 第 1 頁

參、研究設備及器材 ---------- 第 1 頁

肆、研究過程或方法 ---------- 第 1~2 頁

伍、研究結果 ---------- 第 3~8 頁

陸、討論 ---------- 第 8~13 頁

柒、結論 ---------- 第 13~14 頁

捌、參考資料 ---------- 第 14 頁

玖、附表 ---------- 第 15~30 頁

作品名稱：非理想狀態下 NEWTON's CRADLE(牛頓擺)能量傳遞與單擺週期的探討

摘要：探討在非理想狀態下影響 1.牛頓擺碰撞之能量傳遞與 2.單擺週期的因素。

在牛頓擺實驗中，拉起一側的鋼珠，當釋放時，鋼珠(擺錘)將重力位能轉換成動能，並經由與其他鋼珠的碰撞而將能量逐步傳向另一側，使得另一側的鋼珠因能量增加而擺動，且撞擊顆數洽與彈起顆數相同，然後鋼珠又延反方向撞回，如此反覆傳遞能量，使牛頓擺持續的擺動。但因能量不完全傳遞，以及鋼珠彼此間的摩擦、空氣阻力的影響等因素，使兩側的鋼珠擺動振幅因能量減少而逐漸變小。在此討論撞擊與被撞顆數(擺錘)、擺錘質量、擺錘能量、擺錘種類、擺長，對其碰撞(能量傳遞)次數的影響。

在單擺實驗中，單擺每次擺動皆因擺錘與空氣阻力的摩擦而消耗能量，使擺動的振幅與高度會漸漸減少。在此討論擺長、擺角(小於 5°)、擺錘大小、擺錘種類及空氣震動的激烈程度對週期的影響。

壹、研究動機：某日參加本校國立科學教育館之校外教學，於販賣部發現小型牛頓擺。經請教老師後得知，牛頓擺與國中教材(南一自然與生活科技)第五冊功與能單元動能、位能、能量轉換有關。若將牛頓擺擺長加長，愈近似單擺，與國中教材(南一自然與生活科技)第五冊時間單元相關，引發研究興趣。

貳、研究目的：

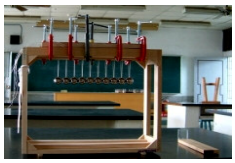
一、探討影響 NEWTON's CRADLE 能量傳遞的因素：能量、材質、質量、體積、擺長、擺角。

二、探討影響單擺週期的因素：擺長、擺角、擺錘重、擺錘體積、擺錘密度、空氣振動。

參、研究設備及器材：

一、牛頓擺：木架、ㄇ字型木條、木條、尼龍線、鋁管、雷神膠、膠帶、L 型木條、C 型夾、直尺(30cm)，鋼球、滑鼠鋼珠橡膠皮、玻璃珠各十顆。

二、單擺：尼龍線、馬表、木條、皮尺、直尺(30cm)、C 型夾、膠帶、牙籤、A.B 膠、剪刀、鐵架、L 型木條、鐵環，鋼球、玻璃珠、鉛球、塑膠油珠各數種。



牛頓擺架

牛頓擺架各式擺錘

單擺各式擺錘

各式工具

肆、研究過程或方式：

一、牛頓擺(NEWTON's CRADLE)能量傳遞的探討：

(一) 製作牛頓擺：長(41.7cm) 寬(16.6cm)高(35.5cm)

1. 以木板製作一木架。(務必水平)
2. 以電動磨刀將鋁管切割成長度 0.6cm 數段備用。
3. 將各式鋼球(直徑：25mm、20mm)、玻璃彈珠(24.5mm)、滑鼠鋼球(含橡膠皮，直徑 22mm) 各 10 顆，以鑽石挫刀磨一凹痕，將步驟 2.之鋁管先以尼龍線約 80cm 長穿過，在以雷神膠黏於各球之凹痕處，待其乾後備用。

P.S.鋁管內之尼龍線須與鋁管黏牢，以免實驗時因線轉動，消耗能量。

4. 取數個木板鑽孔（孔徑 1 ㎜），於其長邊以各式球體的直徑爲孔距，於其短邊

以 3.6 ㎝爲孔距，鑽出兩排孔洞(共 20 孔洞)，將步驟 3 之各組球體上的尼龍線穿過孔洞，並以膠帶先固定尼龍線備用。

5. 將步驟 4 完成的木板置於步驟 1 的木架上，以木條、C 型夾固定，且逐一將 10 顆球調整在同一水平直線上（可藉ㄇ型木條協助）完成各式擺錘。

(二) 探討牛頓擺之能量傳遞的實驗步驟：

1. 取各式牛頓擺，將所有擺長固定爲 7cm，以 L 型木條將 1 顆擺錘水平移動分別爲 1cm、2cm……7 cm 各碰撞 5 次，將各次碰撞(能量傳遞)平均次數記錄於表一中。
2. 將步驟 1.擺長改爲 9.5cm，重複碰撞，將各 5 次碰撞平均次數記錄於表一中。
3. 取直徑 25 ㎜之鋼球牛頓擺，調整使其擺長爲 7cm，先以 L 型木條將 1 顆鋼球水平移動 3cm，依序撞擊 1 顆、2 顆、3 顆……9 顆鋼球 5 次計算其撞擊（能量傳遞）次數求平均值紀錄於表格中。

P.S.撞擊（能量傳遞）次數以撞擊時可使被撞擊之球受力後可分開爲準，若各球連在一起擺動則不計數。

4. 以 2 顆依序撞擊 1 顆、2 顆、……8 顆數次，如步驟 1，將 5 次撞擊次數平均值紀錄於表 3-1 中。
5. 依序完成 3 顆、4 顆、……9 顆之撞擊，將 5 次撞擊次數平均值記錄於表 3-1 中。
6. 將 25mm 之鋼球、牛頓擺調整擺長爲 9.5cm。先以 L 型木條將 1 顆鋼球水平移動 3.4cm，如步驟 1~5 完成，並將結果記錄於表 3-2 中，以待討論。
7. 依續將 20 ㎜鋼球、22 ㎜包裹橡皮外套之滑鼠鋼珠、24.5 ㎜玻璃珠之牛頓擺如步驟 1~6 完成，並將資料依序紀錄於各表 4-1、表 4-2、表 5-1、表 5-2、表 2 中。

二、單擺週期及重力加速度的探討：

(一) 製作各式單擺，以尼龍線做擺長(須超過 200cm)，以大小不同之鋼球、鉛球、玻璃彈珠、塑膠油珠各 1 顆作擺錘，並以少量 A.B 膠黏接。

(二) 以 C 型夾將木條固定於鐵架上，並先於木條上挖一 V 字型小洞(上大下小)，將各式單擺之擺線依序穿過木條上之小洞，將牙籤下方尖端去除，將去除一端從上往下塞進小洞以準確控制擺長之長度。

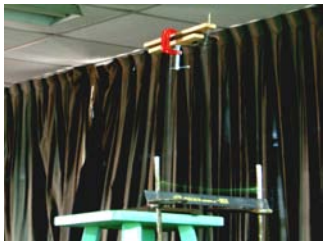
(三) 將擺長調整至 50cm，以 L 型木條扣住擺錘水平移動 3cm，放手使單擺擺動，並以碼表測量擺動時間。(第一次擺動不計時)

(四) 測量單擺擺動 10 次、20 次、30 次、40 次、50 次、100 次、150 次、200 次、250 次、300 次所需時間，並記錄於表格中，且以 Excel 程式計算平均週期、重力加速度以待討論。

(五) 將擺長調整至 200cm，如步驟(三)、(四)，將結果記錄於表格中。

(六) 將各式單擺依(二)、(三)、(四)步驟，一一完成，並紀錄於表格中，以待討論。

牛頓擺實驗



單擺實驗

單擺實驗

伍、實驗結果：

一、牛頓擺(NEWTON's CRADLE)能量傳遞的結果

表 1 (以下資料爲五次實驗數據之平均值並取至整數)

擺錘 / 水平移動 / 擺長	20mm 鋼珠 (1 撞 8)		25mm 鋼珠 (1 撞 9)		25mm 玻璃珠 (1 撞 9)	
	7cm	**9.5 cm**	**7cm**	**9.5 cm**	**7cm**	**9.5 cm**
1cm	**24**	**25**	**16**	**33**	**20**	**24**
2 cm	**39**	**40**	**23**	**47**	**32**	**30**
3 cm	**57**	**54**	**30**	**55**	**42**	**45**
4 cm	**59**	**60**	**37**	**64**	**52**	**60**
5 cm	**61**	**65**	**42**	**67**	**61**	**64**
6 cm	**63**	**70**	**44**	**69**	**64**	**69**
7 cm	**64**	**74**	**45**	**69**	**66**	**75**

表 2：撞擊(能量傳遞)次數 (以下資料爲五次實驗數據之平均值並取至整數)

包橡膠皮滑鼠鋼珠(直徑：22mm　質量：31.2g) 擺長：7 cm 水平拉動 3 cm

撞擊顆數 / 被撞顆數	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	**8**	**6 ~ 7**	**5**	**4**	**3**	**2 ~ 3**	**2**	**1**	**1**
2	**6**	**6 ~ 7**	**4**	**3**	**3**	**2**	**2**	**1**	
3	**5**	**5**	**4 ~ 5**	**3**	**3**	**1 ~ 2**	**1 ~ 2**		
4	**4**	**4**	**4**	**4**	**2 ~ 3**	**1 ~ 2**			
5	**3**	**3**	**4**	**2**	**3**				
6	**3**	**3**	**2**	**1 ~ 2**					
7	**3**	**2**	**2**						
8	**3**	**2**							
9	**2**								

表 3-1：撞擊(能量傳遞)次數 (以下資料爲五次實驗數據之平均值並取至整數)
鋼珠(直徑：25 mm　質量：63.69 g) 擺長：7 cm 水平拉動 3 cm

被撞顆數 \ 擊顆數	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	**224**	**72**	**52**	**31**	**33**	**25**	**24**	**24**	
2	**178**	**113**	**48**	**32**	**35**	**29**	**24**	**25**	
3	**124**	**70**	**60**	**40**	**36**	**29**	**24**		
4	**68**	**50**	**57**	**45**	**36**	**29**			
5	**62**	**54**	**41**	**42**	**37**				
6	**57**	**44**	**38**	**39**					
7	**53**	**35**	**35**						
8	**52**	**33**							
9	**50**								

表 3-2：撞擊(能量傳遞)次數 (以下資料爲五次實驗數據之平均值並取至整數)
鋼珠(直徑：25 mm　質量：63.69 g) 擺長：9.5 cm 水平拉動 3.4 cm

被撞顆數 \ 擊顆數	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	**310**	**114**	**76**	**66**	**62**	**55**	**48**	**46**	**38**
2	**248**	**266**	**84**	**78**	**65**	**59**	**50**	**38**	
3	**166**	**144**	**96**	**84**	**47**	**44**	**38**		
4	**140**	**112**	**110**	**88**	**48**	**34**			
5	**136**	**120**	**92**	**53**					
6	**114**	**98**	**78**	**46**					
7	**106**	**85**	**70**						
8	**98**	**76**							
9	**90**								

表 4-1：撞擊(能量傳遞)次數

鋼珠(直徑：20 mm　質量：32.96 g) 擺長：7 cm 水平拉動 3 cm

被撞顆數 \ 擊顆數	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	**390**	**132**	**96**	**76**	**66**	**70**	**26**	**21**	
2	**190**	**138**	**104**	**74**	**70**	**51**	**26**		
3	**164**	**128**	**130**	**72**	**57**	**37**			
4	**163**	**114**	**103**	**80**	**49**				
5	**110**	**96**	**53**	**51**					
6	**98**	**61**	**56**						
7	**61**	**47**							
8	**57**								
9									

表 4-2：撞擊(能量傳遞)次數

鋼珠(直徑：20 mm　質量：32.96 g) 擺長：9.5 cm 水平拉動 3.4 cm

被撞顆數 \ 擊顆數	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	**380**	**100**	**88**	**85**	**70**	**60**	**26**	**22**	
2	**220**	**116**	**101**	**83**	**66**	**47**	**30**		
3	**189**	**110**	**102**	**80**	**46**	**33**			
4	**159**	**105**	**80**	**53**	**39**				
5	**145**	**70**	**51**	**36**					
6	**115**	**49**	**46**						
7	**63**	**44**							
8	**59**								
9									

表 5-1：撞擊(能量傳遞)次數

玻璃珠(直徑：25 mm　質量：20.58 g) 擺長：7 cm 水平拉動 3 cm

被撞顆數 \ 擊顆數	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	**360**	**103**	**80**	**67**	**41**	**35**	**22**	**24**	**18**
2	**100**	**120**	**88**	**47**	**42**	**26**	**25**	**20**	
3	**87**	**68**	**92**	**49**	**45**	**27 ~ 28**	**22**		
4	**72**	**51**	**62**	**51**	**46**	**27**			
5	**59**	**555**	**50**	**36**	**49**				
6	**56**	**43**	**34**	**29**					
7	**51**	**41**	**31**						
8	**45**	**35**							
9	**39**								

表 5-2：撞擊(能量傳遞)次數

玻璃珠(直徑：25 mm　質量：20.58 g) 擺長：9.5 cm 水平拉動 3.4 cm

被撞顆數 \ 擊顆數	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	**252**	**94**	**64**	**52**	**44**	**39**	**30**	**25**	**25**
2	**171**	**118**	**90**	**54**	**48**	**37**	**30**	**25**	
3	**116**	**104**	**98**	**59**	**48**	**33**	**26**		
4	**110**	**70**	**68**	**64**	**50**	**31**			
5	**100**	**59**	**51**	**46**	**54**				
6	**71**	**51**	**50**	**34**					
7	**69**	**48**	**37**						
8	**62**	**45**							
9	**50**								

二、單擺週期與重力加速度部分

(一)、玻璃珠　　表 6-1　　(詳細資料於附表 1 - 1 ~ 1- 4)

擺長(cm) (l)	外徑(mm)	質量(g)	體積(cm^3)	密度(g/cm^3)	平均週期(s) (T)	重力加速度 $g=4\pi^2l/T^2$	與公認值差 △g=g - 9.82	誤差率(%) (△g/ 9.82)*100%
50	33.5	51.37	19.68489	2.6096156	1.41972	9.79319	-0.02710	-0.27600
	24.5	20.58	7.700109	2.6726895	1.41722	9.82782	0.00753	0.07661
	16.5	6.98	2.352071	2.9675974	1.41421	9.86961	0.04931	0.50212
	14.5	4.28	1.596257	2.6812737	1.41363	9.87771	0.05741	0.58461
200	33.5	51.37	19.68489	2.6096156	2.84413	9.76090	-0.05940	-0.60485
	24.5	20.58	7.700109	2.6726895	2.83952	9.79264	-0.02766	-0.28162
	16.5	6.98	2.352071	2.9675974	2.83591	9.81758	-0.00272	-0.02766
	14.5	4.28	1.596257	2.6812737	2.83123	9.85005	0.02975	0.30296

表 7　　(詳細資料於附表 1- 5)

	擺長(cm) (l)	外徑(mm)	質量(g)	體積(cm^3)	密度(g/cm^3)	平均週期(s) (T)	重力加速度 $g=4\pi^2l/T^2$
無音響	50	14.5	4.28	1.59626	2.68128	1.41363	9.877708
有音響	50	14.5	4.28	1.59626	2.68128	1.41436	9.867623
音量更大更近	50	14.5	4.28	1.59626	2.68128	1.4156	9.850281

(二)鋼珠　　表 6-2　　(詳細資料於附表 2 - 1 ~ 2 - 4)

擺長(cm) (l)	外徑(mm)	質量(g)	體積(cm^3)	密度(g/cm^3)	平均週期(s) (T)	重力加速度 $g=4\pi^2l/T^2$	與公認值差 △g=g - 9.82	誤差率(%) (△g/ 9.82)*100%
50	31.5	130.64	16.44359	7.944736	1.42081	9.77816	-0.0421	-0.42911
	19	28.6	3.591364	7.963548	1.41836	9.81198	-0.0083	-0.08467
	12.5	8.36	1.022654	8.174809	1.41529	9.85461	0.03431	0.34943
	11	5.7	0.696910	8.178962	1.41494	9.85941	0.03911	0.39829
	9.5	3.51	0.448920	7.818756	1.41232	9.89609	0.07579	0.77177
200	31.5	130.64	16.44359	7.944736	2.84903	9.72735	-0.0929	-0.94645
	19	28.6	3.591364	7.963548	2.84373	9.76365	-0.05665	-0.57689
	12.5	8.36	1.022654	8.174809	2.83747	9.80682	-0.01348	-0.13724
	11	5.7	0.696910	8.178962	2.8362	9.81558	-0.00472	-0.04803
	9.5	3.51	0.448920	7.818756	2.83207	9.84425	0.02396	0.24394

(三)塑膠油珠　　表 6-3　　(詳細資料於附表 3-1~3-4)

擺長(cm) (l)	外徑(mm)	質量(g)	體積(cm^3)	密度(g/cm^3)	平均週期(s) (T)	重力加速度 $g=4\pi^2 l/T^2$	與公認值差 △g=g - 9.82	誤差率(%) (△g/ 9.82)*100%
50	30	14.5	14.13717	1.025666	1.41972	9.80959	-0.01072	-0.10908
	24.5	7.67	7.70011	0.996090	1.41722	9.84611	0.02582	0.262823
	18	2.9	3.05363	0.949690	1.41421	9.87538	0.055176	0.561858
	14	1.15	1.43676	0.800415	1.41363	9.92431	0.10400	1.05906
200	30	14.5	14.13717	1.025665	2.84413	9.79519	-0.02511	-0.25570
	24.5	7.67	7.700109	0.996090	2.83952	9.811276	-0.0090	-0.09187
	18	2.9	3.053628	0.949690	2.83591	9.84008	0.01979	0.201481
	14	1.15	1.436756	0.800415	2.83123	9.87491	0.05462	0.556156

(四)鉛球　　表 6-4　　(詳細資料於附表 4-1~4-3)

擺長(cm) (l)	外徑(mm)	質量(g)	體積(cm^3)	密度(g/cm^3)	平均週期(s) (T)	重力加速度 $g=4\pi^2 l/T^2$	與公認值差 △g=g - 9.82	誤差率(%) (△g/ 9.82)*100%
50	15	16.92	1.767146	9.57476	1.41843	9.81097	-0.00933	-0.09498
	12.5	10.89	1.022654	10.64876	1.4174	9.82528	0.00498	0.05072
	10.5	7.2	0.606131	11.87862	1.41501	9.85845	0.03815	0.38851
	8.5	3.74	0.321556	11.63098	1.41327	9.88283	0.06254	0.63681
200	15	16.92	1.767146	9.57476	2.84309	9.76807	-0.05223	-0.53181
	12.5	10.89	1.022654	10.64876	2.84293	9.76916	-0.05114	-0.52073
	10.5	7.2	0.606131	11.87862	2.84005	9.78896	-0.03133	-0.31907
	8.5	3.74	0.321556	11.63098	2.83053	9.85492	0.03462	0.35258

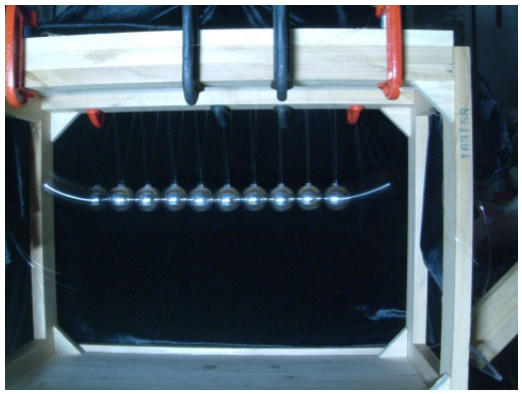
陸、實驗討論

一、牛頓擺討論：

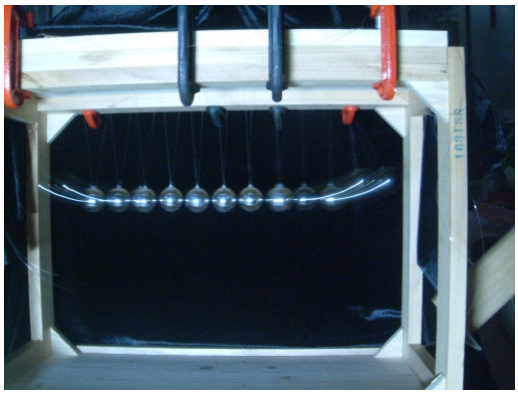
(一) 以不同的擺錘 (大小、材質)，或不同擺長(7cm 及 9.5cm)各以 1 顆撞擊 9 顆或 1 顆撞擊 8 顆改變擺錘水平移動(能量)的大小，由實驗中發現，當水平移動逐漸增加，一開始其撞擊次數增加較多，但當能量(水平位移)到某一大小時，雖繼續增加能量，其撞擊的次數增加幅度變小，且內兩側第 2 顆晃動愈激烈，甚至第 3 顆微動，推測能量傳遞時並未全部傳遞，而是保留一小部份，再將其餘能量往下傳遞，當能量太大時，被撞擊第 1 顆所保留能量足夠讓自己擺動而浪費更多的能量，因此碰撞(傳遞)次數增加逐漸變小。

P.S. 晃動指左右擺動，微動指輕微左右擺動。

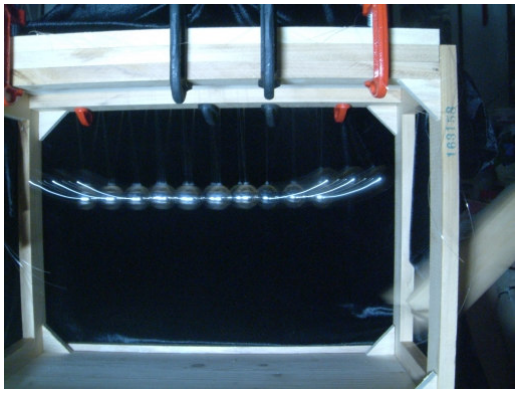
以下照片使用手動數位相機，感光度 400、快門爲(1/2)秒、光圈 8，重複曝光拍攝。



鋼珠 1 顆撞擊 9 顆

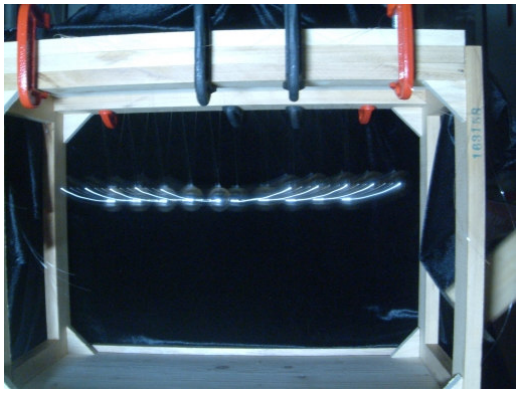


鋼珠 2 顆撞擊 8 顆

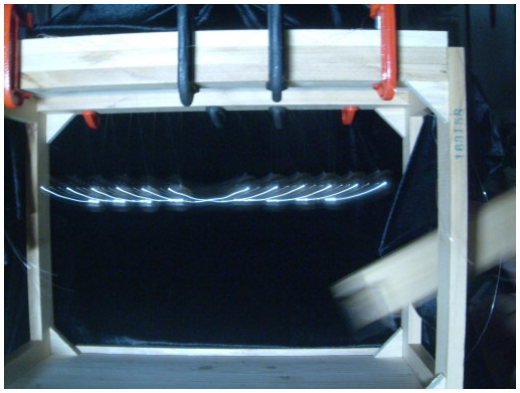


鋼珠 3 顆撞擊 7 顆

鋼珠 4 顆撞擊 6 顆



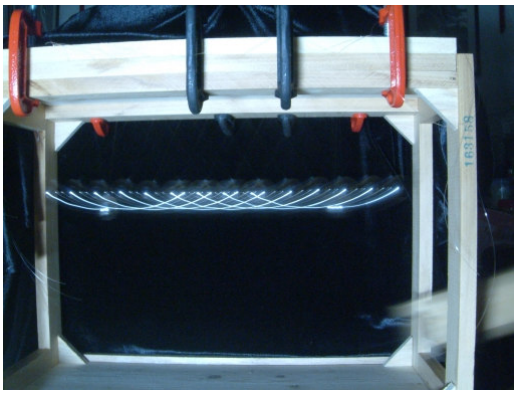
鋼珠 5 顆撞擊 5 顆



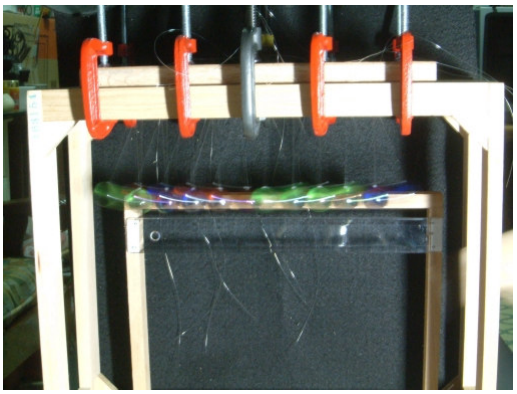
鋼珠 6 顆撞擊 4 顆

鋼珠 7 顆撞擊 3 顆

鋼珠 8 顆撞擊 2 顆



鋼珠 9 顆撞擊 1 顆



玻璃珠 5 顆撞擊 5 顆

(二) 由實驗觀察；以 1 顆(擺錘)撞擊時，另側也有 1 顆彈起，2 顆撞擊時即 2 顆彈起，依此類推 9 顆撞擊時即 9 顆彈起，可由照片中證實，如上列照片。當 1 顆撞 9 顆時，發現左右兩側各有一顆移動，且中間 8 顆不動(可由兩側擺錘中心點弧線證實)。當 2 顆撞 8 顆時，左右兩側各有 2 顆移動，中間六顆不動。當 9 顆撞 1 顆時，左右兩側移動距離較小(即擺錘中心點弧線較短)，而中間 8 顆移動距離較大(即擺錘中心點弧線較大)，這是因爲 9 顆撞 1 顆時，除了被撞的 1 顆彈起，且撞擊前 8 顆彈珠持續向前擺動，與照片中所示符合。

(三) 固定撞擊顆數改變其被撞擊顆數，發現當二者質量差較大時被撞擊的外側第 1 顆會有微動，當質量差更大時甚至擺動外側第 1 顆晃動較大、第 2 顆微動。顯示在撞擊時，被撞擊的第 2 顆並未將全部能量傳出而保留部分能量且被撞擊的第 2 顆也會再保留部分能量而使本身擺動，可由上列照片中(5 打 5 動)發現，中間互相撞擊的兩顆有部分的影像重疊，即表示撞擊的 5 顆並未將能量全部傳出。由實驗中更發現以 1 撞 2 時，兩側各 1 顆輪流擺動，但經一段時間後，中間一顆會開始擺動，待其能量減弱後，再變爲由兩側擺動。因此固定撞擊的顆數，當被撞擊的顆數越多，碰撞(能量傳遞)次數減少。

(四) 固定被撞擊的顆數，當撞擊的顆數越多，擺動的顆數也會越多，造成來回擺動的次數比較少。推論：擺動顆數較多時，因總重量較大，故位能亦較大，但當位能轉變成動能再將能量傳遞(碰撞)，使其動能再次轉變成位能，所需能量亦須較大(△mgh =△1/2mv^2 與質量無關)。且撞擊顆數增加，擺動受到空氣阻力也增加(整體與空氣接觸面積增大)，因此能量消耗較快，造成碰撞次數少。

(五) 改變不同的擺錘材質，發現包橡膠皮的滑鼠鋼珠撞擊次數明顯少於普通鋼珠及玻璃珠。推測：因爲橡膠皮有彈性，吸收部分撞擊力，因此能量傳遞減少，造成擺動的次數減少。

(六) 由實驗中發現，若撞擊顆數與被撞擊顆數兩邊數目一樣(1 撞 2，2 撞 2，依此類推)，碰撞次數相對較多。推論：因爲撞擊者與被撞擊者質量愈接近時，能量的傳遞效果較好，且由各表中發現，當兩者質量相同且顆數增加時，整體與空氣的接觸面積增大，整體擺動的距離(如上列照片中擺錘總弧線長度)增加，空氣阻力消耗的能量增多，造成碰撞次數減少。

(七) 當被撞擊顆數比撞擊顆數多時(1 撞 2，3 撞 5 等)，被撞擊顆數增加，碰撞次數會減少。但是當中間(除兩側擺動外)部分爲奇數顆時(3 撞 4，3 撞 6)，碰撞效果較好。以撞擊顆數 3 顆爲例，3 撞 4 次數爲 57 次，3 撞 5 次數爲 41 次，3 撞 6 次數爲 38

次，3 撞 4 到 3 撞 5 碰撞減少了 16 次，但 3 撞 5 到 3 撞 6 只減少了 3 次。推論：當中間不動的擺錘爲奇數顆，質心剛剛好在最中間的擺錘，所以左右擺錘撞擊的力會在同一顆擺錘上，力部分抵銷，能量的傳遞會比較完全；而中間擺錘爲偶數顆，質心在兩個擺錘中間，經過左右撞擊的時候，擺錘會有擺動的情形，導致能量消耗，造成碰撞的次數減少。

(八) 固定擺錘的總數量，例如取 10 顆鋼珠，撞擊數目比被撞擊數目多的情形(9 撞 1 或 8 撞 2)，其擺動次數會較被撞擊數目比撞擊數目多的情形(1 撞 9 或 2 撞 8)來的少。雖然撞擊數目增加使總能量也增加，但是在擺動時所受到的空氣阻力也增加(可由鋼珠中間總弧線長和增大)，總能量減少，所以擺動的次數較少。由此推測，擺錘藉由撞擊傳遞所散失的能量較由空氣阻力所消耗的能量少。

(九) 本實驗設計爲物體碰撞時，能量傳遞之研究，最早製作之牛頓擺爲單一擺繩，碰撞時發現只要 10 顆擺錘碰撞質心偏斜，擺動立刻零亂，效果相當差，故將其改爲雙繩之擺繩，利用兩繩所產生左右平衡力，使擺錘沿中心直線擺動；但當增加擺長，發現兩邊平衡力不足，且擺動能量愈大，碰撞質心與會偏斜擺動，立刻零亂有如單一擺繩之單擺，故本實驗亦做單擺實驗的探討。

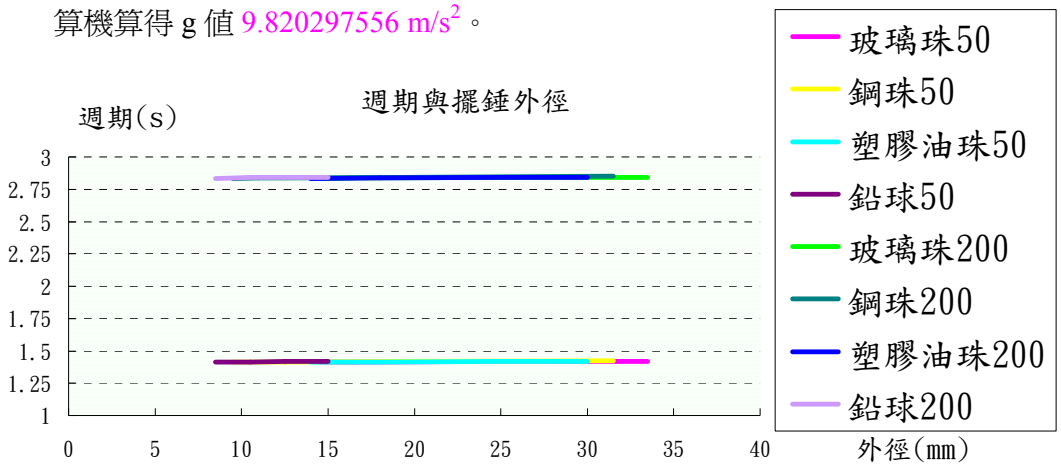
二、單擺週期和重力加速度討論：

(一) 以玻璃珠爲擺錘

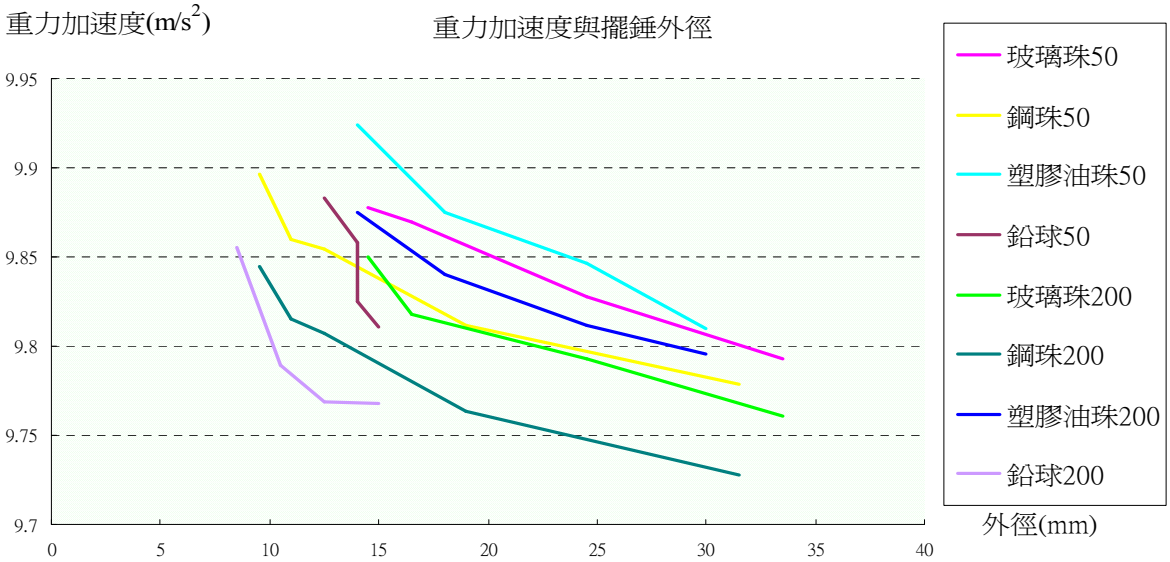
1. 固定擺長爲 50cm 或 200cm，改變玻璃珠的質量、外徑大小，觀察比較其週期，並用週期換算出重力加速度值(即 g 值)。發現隨著外徑的增加，其對應的擺動週期都有增大的趨勢，換算 g 值逐漸減小，在實驗結果中(與理論值之差)由〝+〞變〝-〞，玻璃珠的外徑(表面積)較大，所受到的空氣阻力也隨之增大。所以對同一種物質而言，質量、外徑增加，擺動週期也增加。
2. 固定玻璃珠質量、外徑大小，改變擺長(50cm 和 200cm)，根據公式，若固定重力加速度，單擺擺動週期和擺長平方根成正比($T=2\pi\sqrt{(l/g)}$)，所以 200cm 擺長週期應該爲 50cm 擺長週期的兩倍。將擺長 200cm 的擺動週期和擺長 50cm 的兩倍擺動週期比較，發現擺長較長擺動週期略大於擺長較短的相對擺動週期。推測在固定角度的情況下，擺長較長的玻璃珠速率較快(在相同時間內，移動的距離較長)，而摩擦阻力和物體速率成正比，所以在阻力大的情形下，所測量得擺動週期相對也較大。
3. 固定擺長爲 200cm 時，將擺錘水平移動 15cm(平衡點位置爲 15cm，由 30cm 釋放)觀察其擺動到 20cm 的擺動次數，因爲空氣阻力，消耗了玻璃珠的能量，所以擺動的振幅逐漸減少。質量最大的玻璃珠，其擺動的次數最多，隨著質量的降低而減少。推論：從同樣高度釋放的玻璃珠，在最低點時，速率都相同，所以空氣阻力的影響只和球的表面形狀、表面積有關(與半徑平方成正比)，而相對質量、體積(與半徑三次方成正比)、外徑大的玻璃珠，雖然受到的空氣阻力較大，但因質量相對更大，所以需要較多的擺動次數，才會因爲能量的消耗而進入 20cm 的範圍內，因此外徑大(質量大)的擺動次數就會較多。
4. 固定擺長、擺錘質量，在擺動過程中因能量逐漸減少，振幅逐漸變小，故擺角亦逐漸變小(本次實驗擺角皆在 5° 以內)，其週期沒有明顯的規律變化，故推測擺動週期與擺角(5° 以內)無關。

5. 固定擺長爲 50cm，發現音量增大或距離縮短，其對應的擺動週期較大。推論：音響造成空氣振動，干擾玻璃珠的擺動，當音量增加或距離減小所產生的振動較大，阻礙玻璃珠的擺動，造成週期變大。
6. 由實驗中改變擺錘的外徑大小所得的數據，雖有一定之趨勢，但差異非常不明顯，故特別將實驗中測得週期經由公式換算成重力加速度。因爲重力加速度與週期的平方成反比($g=4\pi^2L/T^2$)，藉由重力加速度較能清楚觀察其變化趨勢。將週期 v.s.外徑、重力加速度 v.s.外徑做成圖表(如下圖表一、二)，在圖表一，其變化趨勢非常不明顯，但由圖表二可以明顯看到，當外徑越大，重力加速度的數值會越小，所以週期的數值應該是越來越大。

ps：本次實驗所用重力加速度的值，採用由中央氣象局所提供的公式：g＝978.03185(１＋0.005278895sin2A＋0.000023462sin4A)，A 爲所在地的緯度，採用由陽明山國家公園網站所提供的台北縣市緯度爲 25.176111，再以工程用計算機算得 g 值 9.820297556 m/s^2。



圖表一



圖表二

(二) 改變擺錘的種類，將其換成塑膠油珠，鉛球，鋼珠這三種材質，實驗的數據整理也都發現到和鉛球相同的結果。

(三) 下列三張照片是將數位相機調整爲手動，感光度調整爲 400、快門時間調整爲(1/1.3)秒、光圈調整爲 8、光源調整爲燈泡。並以自製簡易形閃光燈打光(光源爲 100w 鎢絲燈泡)，改變閃光的頻率所拍攝。照片中可看出單擺擺動的軌跡，當光每閃一次即會留下一個影像，在快門打開到關閉這段時間內所有影像會重複曝光。由照片中可清楚看出擺動過程中，當擺錘擺到最低處速度最快，而兩端速度較慢(可由照片中中間弧線較長，而兩端弧線較短得知)。此乃因單擺擺動過程中，涉及位能與動能間能量的轉換。當擺錘達到最低處，位能最小，減少的位能轉變成動能，故動能最大，速度最快，所以移動距離最大。

照片-1

照片-2

照片-3

柒、結論：

一、牛頓擺部分：

(一) 牛頓擺撞擊時，當以 1 顆撞擊則另一側 1 顆彈起，2 顆撞擊則另一側 2 顆彈起，依此類推 9 顆撞擊則 9 顆彈起擺動，但因能量逐漸減少，振幅逐漸變小。

(二) 當撞擊者與被撞擊者質量差異愈大，或撞擊者能量太大，其能量傳遞效果愈差。

(三) 固定撞擊顆數，被撞擊顆數增加，因爲能量的傳遞顆數較多，產生總能損失，造成碰撞次數減少。

(四) 固定被撞擊顆數，撞擊顆數增加，因爲擺動時所受到的空氣阻力增大(擺動總顆數增加)，能量消耗增多，所以碰撞次數減少。

(五) 橡膠皮具有彈性，會吸收傳遞的能量，所以碰撞次數減少。

(六) 撞擊顆數和被撞擊顆數相同時，能量傳遞較好，擺動次數較多，但總質量愈大(擺動總顆數愈多)傳遞效果愈差。

(七) 固定鋼珠總數，撞擊顆數比被撞擊顆數少的情況(1 撞 2，2 撞 5 等等)會比撞擊顆數比被撞擊顆數多的情況好，擺動的次數較多。

(八) 除擺動顆數外，中間不動的擺錘數若爲奇數，則能量傳遞過程中損失較少，碰撞次數較多。

(九) 鋼珠經由碰撞，能量傳遞不完全，每個鋼珠會留下部分的能量。當保留能量足夠則本身即開始左右擺動，而損失能量，但因傳遞的能量愈來愈少，故保留下的能量也愈少。

二、單擺部分：

(一) 不論擺錘的種類爲何，當擺長固定，擺錘質量越大，擺動週期越大，由公式計算出重力加速度值越小。

(二) 不論擺錘的種類爲何，當擺錘質量固定，擺長越長，其擺動相對週期越大，由公式計算出重力加速度值越小。

(三) 不論擺長，當擺錘外徑越大，計算出重力加速度值與理論值之差都是由〝+〞變〝-〞。

(四) 外徑(體積)越大的擺錘，受到的空氣阻力越大。

(五) 擺長越長的擺錘，受到的空氣阻力越大。

(六) 質量越大的擺錘，擺動的總次數越多。

(七) 對質量大的擺錘而言，空氣阻力對擺動次數的影響較小；對質量小的擺錘而言，空氣阻力對擺動次數的影響較大。

(八) 擺動週期、重力加速度值與擺角(5°以內)無關。

(九) 以玻璃珠而言，音響音量越大，距離越近，擺動週期越大。

捌、參考資料：

(一) Holiday 著 黃崢瑜、王耀常、賴俊豪、廖顯文編譯 (民 92) 基本物理第六版 台北市 全華科技圖書

(二) 褚德三(民 92)。物質科學物理篇。台北市：龍騰。

(三) 郭重吉(民 92) 。自然與生活科技第五冊。台北市：南一。

(四) 黃福坤(民 90 年)。能量傳遞。物理問題討論區。民 93 年 3 月 13 日，取自「物理教學示範實驗教室」：http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=2383&forum=2

(五) 地球的重力如何？(無日期)。地震百問。民 93 年 3 月 14 日，取自「中央氣象局」：http://www.cwb.gov.tw/V4/index.htm

(六) 台北緯度(無日期)。遺產的基本資料。民 93 年 3 月 14 日，取自「陽明山國家公園網」：http://www.ymsnp.gov.tw/html/chi/topic/datunvolcanogroup/1.htm

附表 1-1

玻璃彈珠：33.5mm　；質量：51.37 g　；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.13	14.18	14.2	14.17	1.417	9.830827	0.010529	0.1072182
11~20	14.23	14.23	14.17	14.21	1.421	9.775559	-0.044739	-0.455576
21~30	14.21	14.22	14.21	14.213	1.4213	9.770974	-0.049324	-0.5022611
31~40	14.25	14.2	14.21	14.22	1.422	9.761814	-0.058483	-0.5955330
41~50	14.21	14.19	14.18	14.193	1.419	9.798530	-0.021767	-0.2216566
1~50	71.03	71.02	70.97	71.007	1.420	9.787494	-0.032804	-0.3340407
51~100	71.02	71	71	71.007	1.420	9.787494	-0.032804	-0.3340407
101~150	70.99	71.01	71	71	1.42	9.789332	-0.030966	-0.3153232
151~200	70.99	70.95	70.96	70.967	1.419	9.798530	-0.021767	-0.2216566
201~250	70.96	70.92	70.97	70.95	1.419	9.803134	-0.017163	-0.1747738
總平均					1.420	9.793196	-0.027104	-0.2759993

玻璃彈珠：33.5mm；質量：51.37 g；擺長：200 公分 範圍內：226 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.44	28.42	28.4	28.42	2.842	9.77556	-0.044739	-0.455576
11~20	28.46	28.41	28.42	28.43	2.843	9.76868	-0.051615	-0.525591
21~30	28.42	28.45	28.45	28.44	2.844	9.76181	-0.058483	-0.595533
31~40	28.48	28.45	28.41	28.4467	2.8447	9.75724	-0.063058	-0.642120
41~50	28.45	28.46	28.45	28.4533	2.8453	9.75267	-0.067630	-0.688674
1~50	142.3	142.2	142.1	142.19	2.8438	9.76319	-0.05711	-0.5815506
51~100	142.1	142.2	142.3	142.193	2.8439	9.76273	-0.05757	-0.5862117
101~150	142.2	142.1	142.2	142.183	2.8437	9.76410	-0.056194	-0.5722273
151~200	142.2	142.2	142.2	142.193	2.8439	9.76273	-0.057568	-0.5862117
201~250	142.3	142.2	142.2	142.243	2.8449	9.75587	-0.064430	-0.6560894
251~300	142.3	142.2	142.2	142.237	2.8447	9.75679	-0.063515	-0.6467766
總平均					2.8441	9.7609	-0.059398	-0.6048530

附表 1-2

玻璃彈珠：24.5mm　；質量：20.58 g　；擺長：5０公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.15	14.17	14.18	14.167	1.4167	9.835454	0.015156	0.1543331
11~20	14.13	14.21	14.13	14.157	1.4157	9.849354	0.029056	0.2958773
21~30	14.17	14.16	14.17	14.167	1.4167	9.835454	0.015156	0.1543331
31~40	14.22	14.14	14.15	14.17	1.417	9.830827	0.010529	0.1072182
41~50	14.15	14.17	14.21	14.177	1.4177	9.821583	0.001285	0.0130883
1~50	70.82	70.85	70.84	70.837	1.4167	9.83453	0.014230	0.1449074
51~100	70.85	70.84	70.86	70.85	1.417	9.830827	0.010529	0.1072182
101~150	70.9	70.86	70.87	70.877	1.4175	9.823431	0.003133	0.0319036
151~200	70.87	70.88	70.89	70.88	1.4176	9.822507	0.00221	0.0224953
總平均					1.4172	9.827821	0.007523	0.0766114

玻璃彈珠：24.5mm；質量：20.58 g；擺長：20０公分　範圍內：103　次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.48	28.36	28.33	28.39	2.839	9.796229	-0.024068	-0.2450856
11~20	28.38	28.39	28.41	28.39	2.8393	9.793929	-0.026368	-0.2685064
21~30	28.47	28.42	28.39	28.43	2.8427	9.770974	-0.049324	-0.5022611
31~40	28.35	28.42	28.4	28.39	2.839	9.796229	-0.024068	-0.2450856
41~50	28.34	28.33	28.42	28.36	2.8363	9.814659	-0.005639	-0.0574221
1~50	142.02	141.92	141.95	141.96	2.8393	9.794389	-0.025908	-0.2638229
51~100	142	141.97	142.02	142.00	2.8399	9.789791	-0.030506	-0.3106430
101~150	141.92	142.04	142.01	141.99	2.8398	9.790711	-0.029587	-0.301282
151~200	142.01	142.02	141.92	141.98	2.8397	9.7916303	-0.028667	-0.2919189
201~250	141.93	141.93	141.98	141.95	2.8389	9.7966895	-0.023608	-0.2404005
總平均					2.8395	9.7926418	-0.027656	-0.2816184

附表 1-3

玻璃彈珠：16.5mm　；質量：6.98 g　；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.14	14.12	14.11	14.12	1.4123	9.895901	0.075603	0.7698647
11~20	14.15	14.14	14.21	14.17	1.4167	9.835454	0.015156	0.1543331
21~30	14.11	14.15	14.11	14.12	1.4123	9.895901	0.075603	0.7698647
31~40	14.16	14.12	14.13	14.14	1.4137	9.877242	0.056945	0.5798673
41~50	14.14	14.16	14.14	14.15	1.4147	9.863283	0.042986	0.4377217
1~50	70.7	70.69	70.7	70.70	1.4139	9.873517	0.053219	0.54193234
51~100	70.7	70.73	70.67	70.7	1.414	9.872586	0.052288	0.5324520
101~150	70.68	70.72	70.71	70.70	1.4141	9.871655	0.051357	0.5229729
151~200	70.72	70.7	70.75	70.72	1.4145	9.866076	0.045775	0.4661267
201~250	70.76	70.71	70.72	70.73	1.4146	9.864213	0.043915	0.4471887
總平均					1.4142	9.86961	0.049310	0.5021237

玻璃彈珠：16.5mm　；質量：6.98 g　；擺長：200 公分　範圍內：51 :

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.39	28.29	28.36	28.35	2.8347	9.82620	0.00591	0.0601366
11~20	28.3	28.4	28.33	28.34	2.8343	9.82851	0.008217	0.0836733
21~30	28.44	28.35	28.42	28.40	2.8403	9.78703	-0.03326	-0.3387192
31~40	28.34	28.4	28.38	28.37	2.8373	9.80774	-0.01256	-0.1278579
41~50	28.37	28.34	28.33	28.35	2.8347	9.82620	0.00591	0.0601366
51~60	28.46	28.37	28.39	28.41	2.8407	9.78474	-0.03556	-0.3621070
61~70	28.33	28.33	28.42	28.36	2.836	9.81697	-0.00333	-0.0339269
71~80	28.32	28.32	28.36	28.33	2.8333	9.83545	0.015156	0.1543331
81~90	28.33	28.34	28.28	28.32	2.8317	9.84703	0.026737	0.2722657
91~100	28.31	28.36	28.33	28.33	2.8333	9.83545	0.015156	0.1543331
101~150	141.81	141.83	141.83	141.82	2.8365	9.81374	-0.006562	-0.066818
總平均				425.39	2.8359	9.81758	-0.002716	-0.0276602

附表 1-4

玻璃彈珠：14.5mm　；質量：4.28 g　；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.16	14.1	14.16	14.14	1.414	9.872586	0.0522884	0.5324520
11~20	14.1	14.15	14.09	14.11	1.4113	9.909929	0.0896314	0.9127162
21~30	14.17	14.18	14.1	14.15	1.415	9.858637	0.0383391	0.3904068
31~40	14.14	14.12	14.15	14.14	1.4137	9.877242	0.0569447	0.5798673
41~50	14.09	14.15	14.16	14.13	1.4133	9.881902	0.0616043	0.6273163
1~50	70.66	70.7	70.66	70.67	1.4135	9.880038	0.0597401	0.6083327
51~100	70.71	70.65	70.68	70.68	1.4136	9.878174	0.0578764	0.5893544
101~150	70.68	70.66	70.69	70.68	1.4135	9.879106	0.0588082	0.5988429
151~200	70.68	70.71	70.7	70.70	1.4139	9.873517	0.0532194	0.5419323
總平均					1.4136	9.877708	0.0574105	0.5846107

玻璃彈珠：14.5mm　；質量：4.28g　；擺長：200 公分　範圍內：33 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.36	28.31	28.28	28.32	2.8317	9.847035	0.026737	0.2722657
11~20	28.24	28.28	28.33	28.28	2.8283	9.870259	0.049961	0.5087568
21~30	28.31	28.31	28.3	28.31	2.8307	9.853993	0.033696	0.3431253
31~40	28.37	28.29	28.37	28.34	2.8343	9.828515	0.0082170	0.0836733
41~50	28.27	28.37	28.26	28.3	2.83	9.858637	0.0383391	0.3904069
51~60	28.28	28.25	28.25	28.26	2.826	9.886565	0.0662672	0.6747988
61~70	28.37	28.34	28.36	28.36	2.8357	9.819274	-0.001024	-0.0104235
71~80	28.35	28.4	28.26	28.34	2.8337	9.833140	0.0128421	0.1307715
81~90	28.24	28.27	28.38	28.30	2.8297	9.860959	0.0406619	0.4140601
91~100	28.34	28.36	28.27	28.32	2.8323	9.842400	0.0221023	0.2250677
總平均				283.123	2.83123	9.850049	0.0297518	0.3029623

附表 1-5

玻璃彈珠：14.5mm　；質量：4.28 g　；擺長：50 公分　有音響

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.13	14.12	14.18	14.14	1.4143	9.867933	0.0476353	0.4850701
11~20	14.11	14.16	14.15	14.14	1.414	9.872586	0.0522884	0.5324520
21~30	14.15	14.15	14.12	14.14	1.414	9.872586	0.0522884	0.5324520
31~40	14.18	14.11	14.14	14.14	1.4143	9.867933	0.0476353	0.4850701
41~50	14.14	14.12	14.15	14.14	1.4137	9.877242	0.0569447	0.5798673
1~50	70.71	70.66	70.74	70.70	1.4141	9.871655	0.0513575	0.5229729
51~100	70.73	70.74	70.71	70.72	1.4145	9.865143	0.0448451	0.4566571
101~150	70.7	70.75	70.72	70.72	1.4145	9.866073	0.0457750	0.4661267
151~200	70.75	70.73	70.74	70.74	1.4148	9.861424	0.0411266	0.4187918
201~250	70.67	70.67	70.73	70.69	1.4138	9.875379	0.0550818	0.5608972
251~300	70.73	70.74	70.7	70.72	1.41447	9.866073	0.0457750	0.4661267
總平均					1.41436	9.867623	0.0473252	0.4819125

玻璃彈珠：14.5mm　；質量：4.28g　；擺長：50 公分　音響更大更近

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.2	14.15	14.13	14.16	1.416	9.844717	0.0244194	0.2486625
11~20	14.14	14.14	14.18	14.15	1.4153	9.853993	0.0336960	0.3431253
21~30	14.11	14.17	14.16	14.15	1.4147	9.863283	0.0429856	0.4377217
31~40	14.17	14.16	14.14	14.16	1.4157	9.849354	0.0290560	0.2958773
41~50	14.18	14.15	14.17	14.17	1.4167	9.835454	0.0151560	0.1543331
1~50	70.8	70.77	70.78	70.78	1.4157	9.849354	0.0290560	0.2958773
51~100	70.79	70.78	70.77	70.78	1.4156	9.850281	0.0299837	0.3053242
101~150	70.72	70.8	70.81	70.78	1.4155	9.851209	0.0309116	0.3147725
151~200	70.81	70.78	70.78	70.79	1.4158	9.847499	0.0272010	0.2769874
201~250	70.8	70.79	70.76	70.78	1.4157	9.849354	0.0290560	0.2958773
251~300	70.74	70.77	70.79	70.77	1.4153	9.853993	0.0336960	0.3431253
總平均					1.4156	9.850281	0.0299837	0.3053242

附表 2-1

鋼珠：31.5mm　；質量：130.64 g　；擺長：5０公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.24	14.15	14.23	14.21	1.4207	9.7801465	-0.0401511	-0.4088580
11~20	14.23	14.22	14.18	14.21	1.421	9.775559	-0.0447389	-0.4555760
21~30	14.14	14.25	14.18	14.19	1.419	9.803134	-0.0171633	-0.1747738
31~40	14.19	14.18	14.29	14.22	1.422	9.761814	-0.05848311	-0.5955330
41~50	14.28	14.23	14.19	14.23	1.4233	9.743534	-0.0767637	-0.7816840
1~50	71.08	71.03	71.07	71.06	1.4212	9.772807	-0.0474901	-0.4835910
51~100	71	71.01	71.01	71.01	1.4201	9.787494	-0.03280379	-0.3340407
101~150	71.04	71.04	71.03	71.04	1.4207	9.779229	-0.0410689	-0.4182042
151~200	71.04	71.08	71.05	71.06	1.4211	9.773724	-0.0465732	-0.4742540
201~250	71.05	71.05	71.08	71.06	1.4212	9.772807	-0.0474901	-0.4835910
251~300	71.01	71.03	71.03	71.02	1.4205	9.782901	-0.0373968	-0.3808114
總平均					1.4208	9.778158	-0.0421395	-0.4291065

鋼珠：31.5mm　；質量：130.64g　；擺長：20０公分　範圍內：404 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.48	28.53	28.48	28.50	2.8497	9.723030	-0.0972680	-0.9904788
11~20	28.49	28.43	28.44	28.45	2.8453	9.752668	-0.0676298	-0.6886730
21~30	28.46	28.5	28.56	28.51	2.8507	9.7162092	-0.1040883	-1.0599307
31~40	28.52	28.56	28.47	28.52	2.8517	9.7093960	-0.1109016	-1.1293096
41~50	28.51	28.42	28.49	28.47	2.84737	9.7389718	-0.0813258	-0.8281396
1~50	142.46	142.44	142.44	142.45	2.84897	9.7280358	-0.0922618	-0.9395009
51~100	142.48	142.55	142.42	142.48	2.8497	9.7230296	-0.0972680	-0.9904788
101~150	142.5	142.35	142.45	142.43	2.8487	9.7298572	-0.0904404	-0.9209537
151~200	142.44	142.45	142.53	142.47	2.8495	9.7243945	-0.0959030	-0.9765796
201~250	142.48	142.41	142.42	142.44	2.8487	9.7294018	-0.09089586	-0.9255910
251~300	142.42	142.43	142.46	142.44	2.8487	9.72940177	-0.0908958	-0.9255910
總平均					2.8490	9.7273529	-0.0929447	-0.9464547

附表 2-2

滑鼠鋼珠：19mm　；質量：28.60g　；擺長：50公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.18	14.2	14.14	14.17	1.4173	9.826203	0.0059056	0.0601366
11~20	14.16	14.14	14.2	14.17	1.4167	9.835453	0.0151560	0.1543331
21~30	14.19	14.14	14.18	14.17	1.417	9.830826	0.0105291	0.1072182
31~40	14.16	14.22	14.21	14.20	1.4197	9.793929	-0.0263681	-0.2685064
41~50	14.21	14.19	14.18	14.19	1.4193	9.798530	-0.0217673	-0.2216566
1~50	70.9	70.89	70.91	70.9	1.418	9.816966	-0.0033317	-0.0339269
51~100	70.89	70.95	70.97	70.94	1.4187	9.806820	-0.0134777	-0.1372438
101~150	70.96	70.93	70.86	70.92	1.4183	9.812352	-0.0079455	-0.0809090
151~200	70.94	70.9	70.95	70.93	1.4186	9.808663	-0.0116342	-0.1184708
201~250	70.93	70.91	70.88	70.91	1.4181	9.815120	-0.0051776	-0.0527237
251~300	70.91	70.89	70.95	70.92	1.4184	9.811983	-0.0083145	-0.0846661
總平均					1.4184	9.811983	-0.0083145	-0.0846661

滑鼠鋼珠：19mm；質量：　28.60g　；擺長：200公分　範圍內：138 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.44	28.43	28.44	28.44	2.8437	9.764104	-0.0561944	-0.5722273
11~20	28.43	28.47	28.43	28.44	2.8443	9.759527	-0.0607701	-0.6188304
21~30	28.41	28.43	28.41	28.417	2.8417	9.777852	-0.0424454	-0.4322218
31~40	28.42	28.47	28.42	28.44	2.8437	9.764103	-0.0561944	-0.5722273
41~50	28.53	28.36	28.51	28.467	2.8467	9.743534	-0.0767637	-0.7816836
1~50	142.23	142.16	142.21	142.2	2.844	9.761814	-0.05848311	-0.59553297
51~100	142.14	142.23	142.14	142.17	2.8434	9.765935	-0.0543629	-0.55357688
101~150	142.24	142.21	142.24	142.23	2.8446	9.757697	-0.0626007	-0.63746252
151~200	142.16	142.12	142.16	142.15	2.8429	9.769141	-0.0511565	-0.52092600
總平均					2.8437	9.763645	-0.0566522	-0.57688910

附表 2-3

鋼珠：12.5mm　；質量：8.36 g　；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.19	14.18	14.16	14.18	1.4177	9.821583	0.001285	0.0130883
11~20	14.18	14.16	14.12	14.15	1.4153	9.853993	0.033696	0.3431253
21~30	14.1	14.12	14.19	14.14	1.4137	9.877242	0.056945	0.5798673
31~40	14.15	14.17	14.2	14.17	1.4173	9.826203	0.005906	0.0601366
41~50	14.21	14.12	14.14	14.16	1.4157	9.849354	0.029056	0.2958773
1~50	70.83	70.75	70.81	70.80	1.4159	9.84564	0.025346	0.2581028
51~100	70.79	70.82	70.76	70.79	1.4158	9.847499	0.027201	0.2769874
101~150	70.8	70.74	70.73	70.76	1.4151	9.856779	0.036481	0.3714902
151~200	70.72	70.78	70.76	70.75	1.4151	9.857708	0.037410	0.3809479
201~250	70.78	70.72	70.72	70.74	1.4148	9.861424	0.041127	0.4187918
251~300	70.7	70.76	70.79	70.75	1.415	9.858637	0.038339	0.3904068
總平均					1.4153	9.854612	0.034315	0.3494276

鋼珠：12.5mm　；質量：8.36 g　；擺長：200 公分　範圍內：63 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.31	28.34	28.41	28.35	2.8353	9.821583	0.001285	0.0130883
11~20	28.39	28.33	28.43	28.38	2.8383	9.800832	-0.019466	-0.1982193
21~30	28.45	28.44	28.4	28.43	2.843	9.768683	-0.051615	-0.5255914
31~40	28.35	28.39	28.31	28.35	2.835	9.823893	0.003595	0.0366083
41~50	28.4	28.34	28.31	28.35	2.835	9.823893	0.003595	0.0366083
51~60	28.43	28.45	28.34	28.41	2.8407	9.784738	-0.035551	-0.3621070
61~70	28.3	28.31	28.44	28.35	2.835	9.823893	0.003595	0.0366083
71~80	28.44	28.41	28.35	28.4	2.84	9.789332	-0.030966	-0.3153232
81~90	28.39	28.3	28.43	28.37	2.8373	9.807742	-0.012556	-0.1278579
91~100	28.36	28.44	28.37	28.39	2.839	9.796229	-0.024068	-0.2450856
101~150	141.83	141.81	141.86	141.83	2.8367	9.812352	-0.007946	-0.0809090
總平均					2.8375	9.806820	-0.013478	-0.1372440

附表 2-4

鋼珠：11mm　；質量：5.70 g　；擺長：50公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.13	14.15	14.2	14.16	1.416	9.844717	0.0244194	0.2486625
11~20	14.13	14.18	14.17	14.16	1.416	9.844717	0.0244194	0.2486625
21~30	14.17	14.13	14.15	14.15	1.415	9.858637	0.0383391	0.3904068
31~40	14.11	14.19	14.17	14.16	1.4157	9.849354	0.0290560	0.2958773
41~50	14.18	14.14	14.07	14.13	1.413	9.886565	0.0662672	0.6747988
1~50	70.72	70.79	70.76	70.76	1.4151	9.856779	0.0364814	0.3714902
51~100	70.78	70.78	70.75	70.77	1.4154	9.853065	0.0327677	0.3336731
101~150	70.7	70.77	70.78	70.75	1.415	9.858637	0.0383391	0.3904068
151~200	70.8	70.71	70.78	70.76	1.4153	9.854922	0.0346243	0.3525790
201~250	70.72	70.68	70.74	70.71	1.4143	9.868863	0.0485657	0.4945438
251~300	70.74	70.74	70.71	70.73	1.4146	9.864213	0.0439153	0.4471887
總平均					1.4149	9.859411	0.0391133	0.3982903

鋼珠：11mm；質量：5.70 g；擺長：200公分 範圍內：51 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.31	28.41	28.41	28.38	2.8377	9.8054375	-0.014860	-0.1513110
11~20	28.42	28.34	28.39	28.38	2.8383	9.8008318	-0.019466	-0.1982193
21~30	28.41	28.32	28.35	28.36	2.836	9.8169658	-0.003332	-0.0339269
31~40	28.36	28.42	28.38	28.39	2.8387	9.7985302	-0.021767	-0.2216566
41~50	28.37	28.35	28.4	28.37	2.837	9.8077415	-0.012556	-0.1278579
51~60	28.32	28.41	28.35	28.36	2.836	9.8169658	-0.0033317	-0.0339269
61~70	28.35	28.33	28.39	28.36	2.8357	9.8192739	-0.0010236	-0.0104235
71~80	28.4	28.32	28.35	28.36	2.8357	9.8192739	-0.0010236	-0.0104235
81~90	28.36	28.43	28.3	28.36	2.8363	9.8146585	-0.0056390	-0.0574221
91~100	28.31	28.37	28.37	28.35	2.835	9.8238926	0.0035951	0.0366083
101~150	141.84	141.74	141.71	141.76	2.8353	9.8220447	0.0017472	0.0177916
總平均					2.8362	9.8155814	-0.0047162	-0.0480250

附表 3-1

塑膠油珠：30mm　；質量：14.50　g　；擺長：50公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2 L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.18	14.18	14.15	14.17	1.417	9.830827	0.0105291	0.1072182
11~20	14.21	14.18	14.21	14.2	1.42	9.789332	-0.030966	-0.3153232
21~30	14.16	14.22	14.22	14.2	1.42	9.789332	-0.030966	-0.3153232
31~40	14.23	14.17	14.15	14.18	1.4183	9.812352	-0.007946	-0.0809090
41~50	14.2	14.2	14.19	14.20	1.4197	9.793929	-0.026368	-0.2685064
1~50	70.98	70.95	70.92	70.95	1.419	9.803134	-0.017163	-0.1747738
51~100	70.95	70.94	70.96	70.95	1.419	9.803134	-0.017163	-0.1747738
101~150	70.88	70.95	70.92	70.92	1.4183	9.812352	-0.007946	-0.0809090
151~200	70.89	70.86	70.9	70.88	1.4177	9.821583	0.001285	0.0130883
201~250	70.93	70.93	70.94	70.93	1.4187	9.807742	-0.012556	-0.1278579
總平均					1.4185	9.809585	-0.010712	-0.1090823

塑膠油珠：30mm　；質量：14.50 g　；擺長：200公分　範圍內：78 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2 L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.37	28.45	28.34	28.39	2.8387	9.798530	-0.021767	-0.2216566
11~20	28.37	28.37	28.41	28.38	2.8383	9.800832	-0.019466	-0.198219
21~30	28.43	28.44	28.38	28.42	2.8417	9.77785	-0.042445	-0.4322211
31~40	28.4	28.37	28.48	28.42	2.8417	9.77785	-0.042445	-0.4322211
41~50	28.38	28.38	28.4	28.39	2.8387	9.79853	-0.021767	-0.2216566
1~50	141.95	142.01	142.01	141.99	2.8398	9.790711	-0.029587	-0.3012816
51~100	141.96	141.92	141.95	141.94	2.8389	9.797150	-0.023148	-0.2357150
101~150	141.93	141.96	141.93	141.94	2.8388	9.797610	-0.022688	-0.2310292
151~200	141.97	141.9	141.95	141.94	2.8392	9.795156	-0.025142	-0.2560163
201~250	141.96	141.97	141.94	141.96	2.8391	9.795310	-0.024988	-0.2544549
總平均					2.8392	9.795187	-0.025111	-0.2557041

附表 3-2

塑膠油珠：24.5mm　；質量：7.67 g　；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.11	14.18	14.15	14.15	1.4147	9.863283	0.0429856	0.4377217
11~20	14.18	14.16	14.17	14.17	1.417	9.830827	0.0105291	0.1072182
21~30	14.21	14.11	14.14	14.15	1.4153	9.853993	0.033696	0.3431253
31~40	14.11	14.19	14.18	14.16	1.416	9.844717	0.0244194	0.2486625
41~50	14.17	14.17	14.15	14.16	1.4163	9.840084	0.0197860	0.2014811
1~50	70.78	70.81	70.79	70.79	1.4159	9.846571	0.0262737	0.2675444
51~100	70.79	70.8	70.83	70.81	1.4161	9.842863	0.0225657	0.2297860
101~150	70.81	70.77	70.81	70.80	1.4159	9.845644	0.0253465	0.2581028
151~200	70.79	70.78	70.78	70.78	1.4157	9.849354	0.0290560	0.2958773
總平均					1.4159	9.846108	0.0258100	0.2628235

塑膠油珠：24.5mm　；質量：7.67 g　；擺長：200 公分　範圍內：47 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.33	28.39	28.33	28.35	2.835	9.823893	0.003595	0.036608
11~20	28.4	28.33	28.4	28.38	2.8377	9.805437	-0.01486	-0.151320
21~30	28.32	28.42	28.32	28.35	2.8353	9.821583	0.0012857	0.013088
31~40	28.44	28.37	28.38	28.40	2.8397	9.791630	-0.02867	-0.291919
41~50	28.34	28.37	28.39	28.37	2.8367	9.812352	-0.0079	-0.080909
51~60	28.43	28.4	28.31	28.38	2.838	9.803134	-0.01716	-0.174774
61~70	28.36	28.33	28.41	28.37	2.8367	9.812352	-0.0079	-0.080909
71~80	28.33	28.34	28.35	28.34	2.834	9.830827	0.010529	0.107218
81~90	28.37	28.35	28.36	28.36	2.836	9.816966	-0.00333	-0.033927
91~100	28.35	28.32	28.42	28.36	2.8363	9.814659	-0.00564	-0.057422
101~150	141.85	141.88	141.88	141.87	2.8374	9.807281	-0.0130	-0.132551
總平均				425.523	2.83682	9.811276	-0.00902	-0.091867

附表 3-3

塑膠油珠：18mm　；質量：2.90g　；擺長：50公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.1	14.11	14.12	14.11	1.411	9.914612	0.094314	0.960401
11~20	14.15	14.11	14.11	14.12	1.4123	9.895901	0.075603	0.769865
21~30	14.11	14.13	14.1	14.11	1.4113	9.909930	0.089631	0.912716
31~40	14.14	14.12	14.14	14.13	1.4133	9.881902	0.061604	0.627316
41~50	14.17	14.14	14.14	14.15	1.415	9.858637	0.038339	0.390407
51~60	14.15	14.15	14.14	14.15	1.4147	9.863283	0.042986	0.437722
61~70	14.14	14.1	14.15	14.13	1.413	9.886565	0.066267	0.674799
71~80	14.16	14.14	14.1	14.13	1.4133	9.881902	0.061604	0.627316
81~90	14.16	14.16	14.14	14.15	1.4153	9.853994	0.03370	0.343125
91~100	14.1	14.15	14.16	14.14	1.4137	9.877242	0.056945	0.579867
101~150	70.69	70.75	70.69	70.71	1.4142	9.869794	0.049496	0.504019
151~200	70.7	70.72	70.74	70.72	1.4144	9.867003	0.046705	0.475598
總平均				282.76	1.4138	9.875379	0.055082	0.560897

塑膠油珠：18mm　；質量：2.90g　；擺長：200公分　範圍內：27次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.41	28.38	28.3	28.36	2.8363	9.814659	-0.005639	-0.0574221
11~20	28.33	28.29	28.39	28.34	2.8337	9.833140	0.0128421	0.1307715
21~30	28.36	28.35	28.27	28.33	2.8327	9.840084	0.0197860	0.2014811
31~40	28.24	28.35	28.37	28.32	2.832	9.844717	0.0244194	0.2486625
41~50	28.36	28.25	28.34	28.32	2.8317	9.847035	0.0267373	0.2722657
51~60	28.35	28.34	28.35	28.35	2.8347	9.826203	0.0059056	0.0601366
61~70	28.31	28.31	28.28	28.3	2.83	9.858637	0.0383391	0.3904068
71~80	28.36	28.3	28.38	28.35	2.8347	9.826203	0.0059056	0.0601366
81~90	28.33	28.26	28.37	28.32	2.832	9.844717	0.0244194	0.2486625
91~100	28.24	28.41	28.22	28.29	2.829	9.865608	0.0453100	0.4613917
總平均					2.8327	9.840084	0.0197860	0.2014811

附表 3-4

塑膠油珠：14mm　；質量：1.15 g　；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.03	14.1	14.16	14.10	1.4097	9.933376	0.1130786	1.1514780
11~20	14.09	14.13	14.05	14.09	1.409	9.942778	0.1224807	1.2472201
21~30	14.12	14.12	14.13	14.12	1.4123	9.895901	0.0756030	0.7698647
31~40	14.14	14.08	14.1	14.11	1.4107	9.919298	0.0990003	1.0081194
41~50	14.09	14.08	14.07	14.08	1.408	9.956907	0.1366090	1.3910882
51~60	14.09	14.15	14.07	14.10	1.4103	9.923987	0.1036897	1.0558717
61~70	14.12	14.1	14.15	14.12	1.4123	9.895901	0.0756030	0.7698647
71~80	14.11	14.12	14.09	14.11	1.4107	9.919298	0.0990003	1.0081194
81~90	14.11	14.09	14.16	14.12	1.412	9.900573	0.0802758	0.8174481
91~100	14.12	14.1	14.07	14.10	1.4097	9.933376	0.1130786	1.1514780
101~150	70.51	70.5	70.49	70.5	1.41	9.928680	0.1083825	1.1036579
總平均				211.55	1.4103	9.924300	0.1040024	1.0590564

塑膠油珠：14mm　；質量：1.15 g　；擺長：200 公分　範圍內：13 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.28	28.28	28.28	28.28	2.828	9.872586	0.0522884	0.5324520
11~20	28.24	28.32	28.23	28.26	2.8263	9.884233	0.0639354	0.6510533
21~30	28.31	28.27	28.29	28.29	2.829	9.865608	0.0453100	0.4613917
31~40	28.29	28.26	28.3	28.28	2.8283	9.870259	0.0499614	0.5087568
41~50	28.3	28.31	28.25	28.29	2.8287	9.867933	0.0476353	0.4850701
51~60	28.23	28.24	28.3	28.26	2.8257	9.888898	0.0685999	0.6985526
總平均					2.8277	9.874914	0.0546161	0.5561554

附表 4-1

鉛球：15　mm　；質量：16.92g　；擺長：50公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.15	14.21	14.14	14.17	1.4167	9.835454	0.0151560	0.1543331
11~20	14.14	14.17	14.2	14.17	1.417	9.830827	0.0105291	0.1072182
21~30	14.19	14.21	14.19	14.20	1.4197	9.793929	-0.026368	-0.2685064
31~40	14.2	14.19	14.19	14.19	1.4193	9.798530	-0.021767	-0.2216566
41~50	14.23	14.14	14.2	14.19	1.419	9.803134	-0.017163	-0.1747738
1~50	70.91	70.92	70.92	70.92	1.4183	9.812352	-0.007946	-0.0809090
51~100	70.96	70.98	70.91	70.95	1.419	9.803134	-0.017163	-0.1747738
101~150	70.94	70.93	70.92	70.93	1.4186	9.808663	-0.011634	-0.1184708
151~200	70.88	70.96	70.94	70.93	1.4185	9.809585	-0.010712	-0.1090823
201~250	70.89	70.9	70.9	70.90	1.4179	9.817889	-0.002409	-0.0245265
251~300	70.93	70.87	70.93	70.91	1.4182	9.814197	-0.006100	-0.0621201
總平均					1.4184	9.810969	-0.009329	-0.0949971

鉛球：15　mm　；質量：16.92g　；擺長：200公分　範圍內：111 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.4	28.49	28.41	28.43	2.8433	9.766393	-0.053905	-0.548913
11~20	28.47	28.41	28.45	28.44	2.8443	9.759527	-0.060771	-0.61883
21~30	28.37	28.46	28.36	28.40	2.8397	9.791630	-0.028667	-0.291919
31~40	28.46	28.44	28.45	28.45	2.845	9.754953	-0.065344	-0.66540
41~50	28.48	28.39	28.4	28.42	2.8423	9.773266	-0.047032	-0.478923
1~50	142.18	142.19	142.07	142.15	2.8429	9.769141	-0.051156	-0.520926
51~100	142.17	142.22	142.2	142.20	2.8439	9.762272	-0.058025	-0.590872
101~150	142.1	142.1	142.11	142.10	2.8421	9.775100	-0.045198	-0.460246
151~200	142.19	142.13	142.16	142.16	2.8432	9.767309	-0.052989	-0.539586
201~250	142.15	142.21	142.19	142.18	2.8437	9.764103	-0.056194	-0.572227
251~300	142.18	142.12	142.11	142.137	2.8427	9.7705163	-0.049782	-0.506928
總平均					2.8431	9.768072	-0.052225	-0.531811

附表 4-2

鉛球：12.5 mm ；質量：10.89g；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.17	14.15	14.17	14.16	1.4163	9.840084	0.0197860	0.2014811
11~20	14.21	14.24	14.2	14.22	1.4217	9.766393	-0.053905	-0.5489135
21~30	14.16	14.16	14.15	14.16	1.4157	9.849354	0.0290560	0.2958773
31~40	14.18	14.2	14.16	14.18	1.418	9.816966	-0.003332	-0.0339269
41~50	14.14	14.15	14.22	14.17	1.417	9.830827	0.0105291	0.1072182
1~50	70.86	70.9	70.9	70.89	1.4177	9.820660	0.0003617	0.0036826
51~100	70.89	70.93	70.9	70.91	1.4181	9.815120	-0.0051776	-0.0527237
101~150	70.86	70.86	70.83	70.85	1.417	9.830827	0.0105291	0.1072182
151~200	70.89	70.85	70.89	70.88	1.4175	9.823431	0.0031330	0.0319036
201~250	70.83	70.86	70.8	70.83	1.4166	9.836380	0.0160817	0.1637600
總平均					1.4174	9.825279	0.0049813	0.0507243

鉛球：12.5 mm ；質量：10.89g ；擺長：200 公分　範圍內：88 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.47	28.47	28.39	28.44	2.8443	9.759527	-0.060771	-0.618830
11~20	28.44	28.41	28.44	28.43	2.843	9.768683	-0.051615	-0.5255914
21~30	28.47	28.39	28.45	28.44	2.8437	9.764103	-0.056194	-0.5722273
31~40	28.38	28.42	28.47	28.42	2.8423	9.773266	-0.047032	-0.4789227
41~50	28.42	28.49	28.39	28.43	2.8433	9.766393	-0.053905	-0.5489135
1~50	142.18	142.18	142.14	142.17	2.8433	9.766393	-0.053905	-0.5489135
51~100	142.08	142.11	142.19	142.13	2.8425	9.771891	-0.048407	-0.4929267
101~150	142.18	142.18	142.09	142.15	2.843	9.768683	-0.051615	-0.5255914
151~200	142.1	142.12	142.19	142.15	2.8427	9.770516	-0.049782	-0.5069278
201~250	142.17	142.12	142.18	142.16	2.8431	9.767767	-0.052531	-0.5349212
251~300	142.19	142.18	142.09	142.153	2.8429	9.769714	-0.050584	-0.5150938
總平均					2.8429	9.769160	-0.051137	-0.5207316

附表 4-3

鉛球：10.5 mm ；質量：7.2g ；擺長：50 公分

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	14.18	14.14	14.11	14.14	1.4143	9.867933	0.0476353	0.4850701
11~20	14.14	14.19	14.17	14.17	1.4167	9.835454	0.0151560	0.1543331
21~30	14.1	14.09	14.11	14.1	1.41	9.928680	0.1083825	1.1036579
31~40	14.13	14.15	14.19	14.16	1.4157	9.849354	0.0290560	0.2958773
41~50	14.14	14.18	14.12	14.15	1.4147	9.863283	0.0429856	0.4377217
1~50	70.69	70.75	70.7	70.71	1.4143	9.868863	0.0485657	0.4945438
51~100	70.73	70.78	70.81	70.77	1.4155	9.852137	0.0318396	0.3242221
101~150	70.79	70.77	70.77	70.78	1.4155	9.851209	0.0309116	0.3147725
151~200	70.72	70.77	70.76	70.75	1.415	9.858637	0.0383391	0.3904068
201~250	70.77	70.74	70.71	70.74	1.4148	9.861424	0.0411266	0.4187918
總平均					1.4150	9.858451	0.0381533	0.3885149

鉛球：10.5 mm ；質量：7.2g ；擺長：200 公分 範圍內：88 次

擺動次數	擺動時間			平均	週期	$g=4\pi^2L/T^2$	與公認值差	誤差百分率%
	第一次	第二次	第三次					
1~10	28.41	28.42	28.39	28.41	2.8407	9.784738	-0.035560	-0.3621070
11~20	28.4	28.35	28.47	28.41	2.8407	9.784738	-0.035560	-0.3621070
21~30	28.38	28.41	28.42	28.40	2.8403	9.787034	-0.033263	-0.3387192
31~40	28.42	28.4	28.37	28.40	2.8397	9.791630	-0.028667	-0.2919189
41~50	28.33	28.44	28.45	28.41	2.8407	9.784738	-0.035560	-0.3621070
1~50	141.94	142.02	142.1	142.02	2.8404	9.786575	-0.033723	-0.3433975
51~100	142.03	141.97	141.98	141.99	2.8399	9.790251	-0.030047	-0.3059625
101~150	141.96	142.07	142.02	142.02	2.8403	9.787034	-0.033263	-0.3387192
151~200	141.96	142.02	141.95	141.98	2.8395	9.792550	-0.027748	-0.2825549
201~250	142.05	141.95	142.02	142.01	2.8401	9.788413	-0.031885	-0.3246826
總平均					2.8401	9.788964	-0.031333	-0.3190671

中華民國第45屆中小學科學展覽會作品說明書

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會

評　　語

國中組 理化科

最佳團隊合作獎

031608

非理想狀態下 Newton's CRADLE(牛頓擺)能量傳遞與單擺週期的探討

臺北縣立福營國民中學

評語：

1. 能配合教材內容對市售玩具加以改進，並進一步對相關的變因加以探討。
2. 研究成員之間的分工合作及團隊默契良好。