

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 理化科

第三名

最佳創意獎

031613

它抓得住我一以自製精密計時器探討" g "世界的奧妙

學校名稱：新竹市立光武國民中學

作者： 國二 楊上遠 國二 陳俊強 國二 黃夢堯 國二 王允中	指導老師： 林茂成
---	--------------

關鍵詞：g 值 光敏計時器 單擺

它抓得住我

—以自製精密計時器探討"g"世界的奧妙

摘要

上理化課的時候常以馬錶計時來進行實驗，但不同的學生常會有不同的測量結果。我們用數位相機、簡單的電子元件與馬錶，設計同步出攝影、簧片、磁簧、光敏感應四組精確測量時間的裝置，其中以光敏感應組最精確，可以測到千分之一秒的反應時間。其他方式也各有優點；例如同步攝影適合測量較低速的運動物體，簧片及磁簧的感應方式簡易又精確。運用光敏感應測量自由落體的運動時間，發現亞里斯多德「重物先落下」及伽利略「物體皆同時落下」的觀念，應分別是以小於兩百公克重的重物以及大於三百公克重的重物做自由落體實驗所歸納出的結論。光敏計時器的精確度可以精確測量單擺擺動週期，再推算出地球的重力加速度 g 值，實驗中， g 值變化受月亮位置的影響最大，其次是海拔高度以及太陽。這些精密的測量裝置可廣泛應用在理化課程的實驗，以滑車實驗為例，利用此實驗裝置較傳統測量結果增加 25 倍的精確度。

壹、研究動機

家中的鐘擺總是規律性的擺動似乎不曾停止，擁有著催眠般的魔力，就是這股力量，勾起我們的求知慾，以自製計時裝置測量單擺的擺動週期，結果發現這迷人的秘密-重力加速度會受月亮及太陽位置不同而有所改變。我們又進一步將光敏計時器應用於教具滑車計時器實驗，發現光敏計時器這簡單的設計就可以看到自然界細緻的現象。人說「細推物理需行樂，何用浮榮絆此生」期待從實驗咀嚼其中的樂趣，探討"g"世界的奧妙。

貳、研究目的

- 一、自製精密測量時間之實驗裝置
- 二、由不同測量的方式探討自由落體的速度變化與加速度的測定
- 三、利用單擺的擺動探討地球重力加速度 g 值的測量
- 四、以自製的精密計時裝置應用在理化實驗課程的探討

參、研究器材

壓克力管(內徑 4cm)	線圈	墜落重物
簧片開關	吸管	單擺
磁簧開關	馬錶	電源供應器
光敏電阻	相機	Al 金屬管(內徑 5cm)
雷射筆	磁鐵(900 高斯)	滑車組

肆、研究過程與討論

實驗一 自製精密測量時間之實驗裝置

理化實驗時我們常用來測量時間的工具是「馬錶」，但是在手按馬錶測量時間的過程總是呈現不同同學就有不同的測量值，老師說那叫做「人為誤差」，另外還有馬錶的有效位數所引起的稱為「儀器誤差」。我們選擇一些簡單的電子元件，藉由市面上販賣的光敏小夜燈的簡單電路，自己設計了一種可以精確用來測量時間的實驗裝置。

一、實驗一裝置及步驟

(一) 馬錶的改良

1. 準備一只馬錶(本實驗選擇兩種款式，一為 CASIO HS-20 運動馬錶有效位數為百分秒；一為 CASIO HS-60W 運動馬錶有效位數為千分秒)，將馬錶背蓋打開以焊槍小心將感應線連接馬錶的計時端與歸零端，步驟如下圖所示。

馬錶： CASIO HS-20			
馬錶： CASIO HS-60W			
步驟	1. 選取二馬錶 CASIO HS-20 CASIO HS-60W 最小位數分別為 0.01 秒、0.001 秒	2. 將殼蓋打開，並 依照開始端、歸 零端之接點焊上 電線並接出。	開始端：a 共用點：b 歸零端：c 3. 開始：a 碰觸 b 歸零：c 碰觸 b

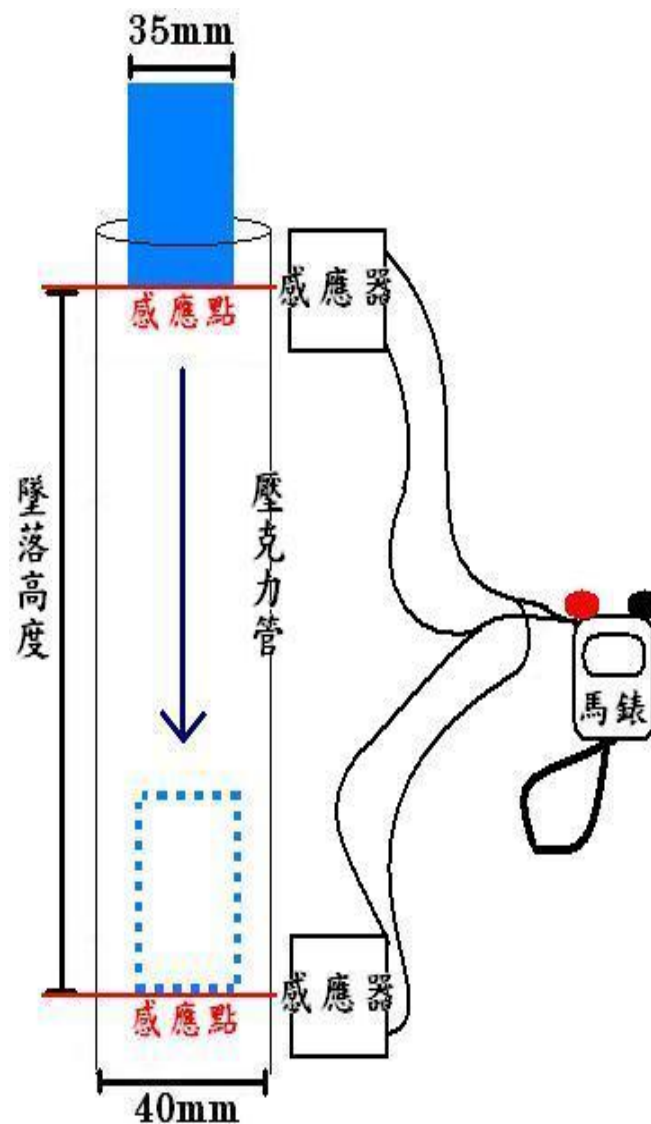
2. 檢驗改良後的馬錶，以感應線接觸計時及歸零的動作是否運作正常。

(二) 感應器的設計

1. 數位攝影組：用之前實驗室的學長設計的「同步攝影法」，由數位攝影同時拍攝馬錶及物體運動情形，再由電腦定格看出物體運動的時間變化。
2. 簧片開關組：將簧片開關與馬錶的計時端相連接，利用重物運動落下時與簧片接觸，控制馬錶的計時功能，記錄數組時間。
3. 磁簧開關組：與簧片開關的設計相似，唯與馬錶計時端相連結的為簧片開關，另外運動的重物則必須內附一磁鐵，方能在運動的過程中啟動開關的連結。
4. 光敏開關組：由市售的「光敏小夜燈」我們發現因其電路中有一「反向器」的電子元件，致使光敏電阻可以反向使用，故我們以線圈、雙向磁簧開關設計一組「自組反向器」連結在光敏開關組的感應器上，測量重物落下通過的時間。

(三) 利用以下裝置(P1-1)將直徑 35mm，長 15cm，重 350g 之重物由壓克力管上端自由落下，分別於 50、175、200cm 處以磁簧感應器配合有效位數為百分秒和千分秒的馬錶測量時間，記錄並比較其差異。

(四) 重複步驟(三)，並改變感應器。



(P1-1)

二、實驗一結果

(一) 將內部線路接出後的馬錶



(P1-2)有效位數 1/100sec.之馬錶

(CASIO HS-20)

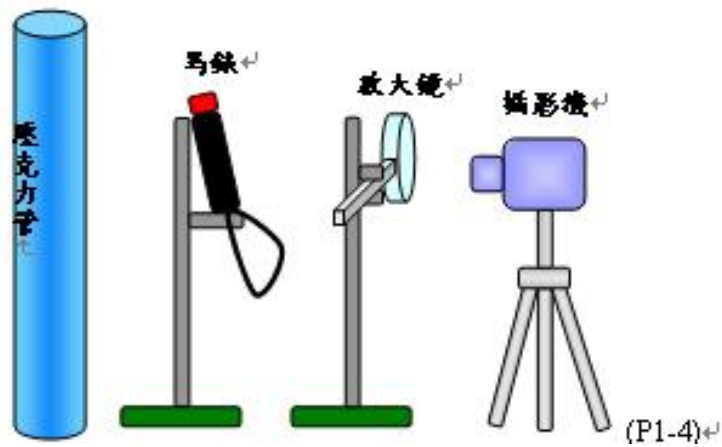


(P1-3)有效位數 1/1000sec.之馬錶

(CASIO HS-60W)

(二) 不同的感應器

1. 數位攝影組



(P1-4)

1. 簧片開關組：將簧片感應器連接至馬錶計時端，按下開關即可使馬錶通電，開始計時。



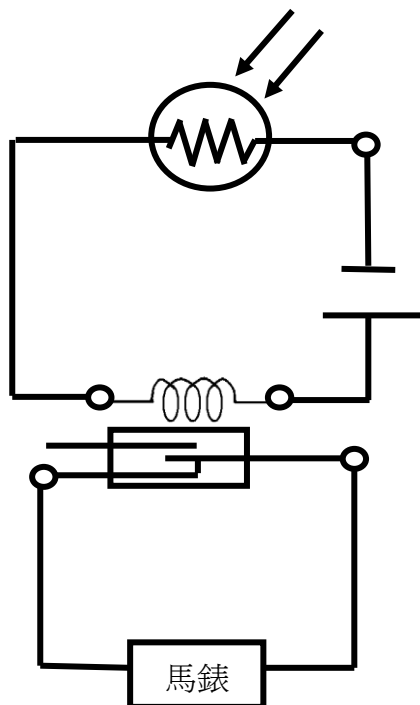
(P1-5)簧片感應器連接馬錶

2. 磁簧開關組：兩頭分別連接至馬錶計時端，當磁鐵通過，磁簧感應器形成通路，使馬錶開始計時。當磁鐵再次通過時，即可停止計時。



(P1-6)磁簧感應器連接至馬錶

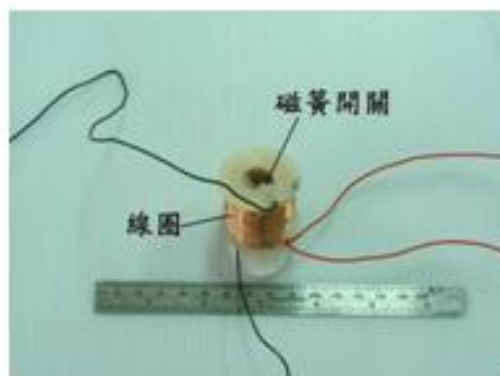
3. 光敏開關組：一般市售「光敏小夜燈」在屋內沒有光線時，會自動亮起；當屋內有光線時，會自動熄滅，這就是我們需要的實驗電路設計，所以我們嘗試經由拆解小夜燈了解如何設計這電路。我們發現小夜燈裡的光敏電阻連接著「反向器」，此裝置致使光敏電阻可以反向操作(P1-7)。唯經實驗發現反向器反應時間約需 0.5 秒，這延遲的時間造成實驗的誤差很大，最後我們以雙向磁簧開關、線圈自組一組可以將訊號反向處理的反向器，幾乎可以沒有誤差的測量到物體運動所需的時間。



(P1-7) 光敏電阻加自組反向器電路圖



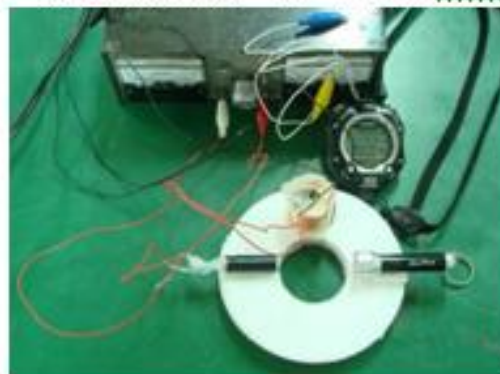
(P1-8)製作光電計時器所需材料



(P1-9)雙向磁簧開關、線圈自組「反向器」



(P1-10)將光敏電阻製入吸管中自製偵測器



(P1-11)完成光敏開關組

(三) 分別以不同有效位數馬錶測量自由落體自不同高度落下測得時間(sec.)如下表：

重物：重 350g、直徑 35mm

高度 (cm)	馬錶有效 位數(sec.)	實驗次數					平均值 (sec.)
		1	2	3	4	5	
50	1/100	0.31	0.32	0.33	0.32	0.31	0.318
	1/1000	0.319	0.320	0.319	0.323	0.321	0.3204
175	1/100	0.59	0.60	0.60	0.59	0.58	0.592
	1/1000	0.603	0.599	0.602	0.602	0.599	0.6010
200	1/100	0.63	0.63	0.65	0.64	0.63	0.636
	1/1000	0.641	0.638	0.641	0.639	0.638	0.6394

(T1-1)

(四) 分別以不同的感應器測量自由落體由 200cm 落下測得時間(sec.)如下表：

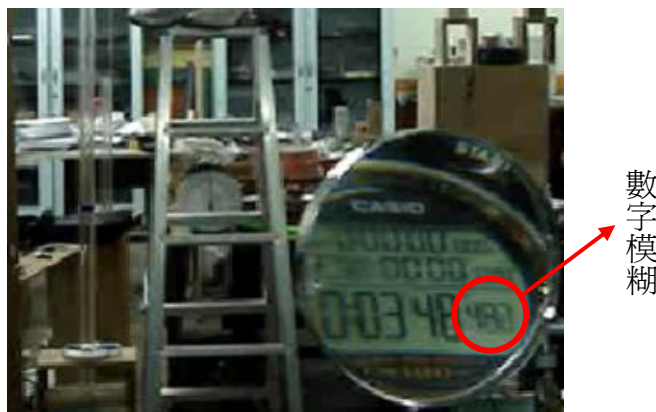
重物：重 350g、直徑 35mm

實驗次數 感應器	1	2	3	4	5	平均值 (sec.)
數位攝影組	0.650	0.658	0.669	0.636	0.673	0.6572
簧片開關組	0.636	0.631	0.654	0.629	0.644	0.6388
磁簧開關組	0.636	0.643	0.64	0.641	0.636	0.6392
光電開關組	0.639	0.641	0.641	0.64	0.64	0.6402

(T1-2)

三、實驗一討論

- (一) 數位攝影組測定自由落體所需時間，會因拍攝時重物高速運動，造成定格畫面模糊(圖 1-1)，難以辨認馬錶的數據，又攝影的拍攝畫面為每秒 30 張畫面，故若物體的運動速率在 3m/s 內，換算成自由落體的時間-即在 0.3 秒內的運動物體的時間測量同步攝影法的測量才有意義。



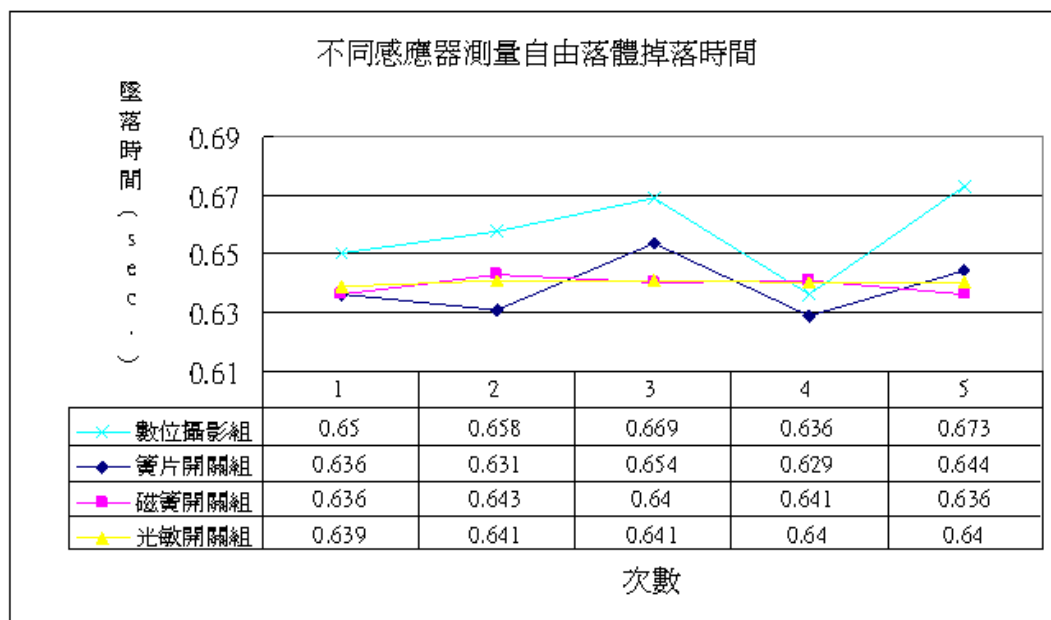
(圖 1-1)數位攝影組之定格畫面

- (二) 簧片開關組以與重物接觸來啟動、關閉馬錶的計時開關，由上述實驗發現測量值的精確度如下表 1-2 所示比攝影法有顯著的效果外但比其他兩種略差，可能是因為撞擊開關時所產生的作用力所造成，但簧片開關的設計適合在起始位置的時間測量，因為由接觸的測量較方便操作。
- (三) 磁簧開關組的測量原理是利用磁場的感應去啟動開關，能隔著物體感應測量，具有特殊、方便的用途。此外因是依靠磁場來啟動，故測量時運動物體須具有磁性，這可以在重物內加磁鐵來克服，但實驗發現若加入的磁鐵磁場強度太強，會有提前感應開關的現象，若磁性太弱，當物體運動速度快速時則開關又毫無反應，即以磁簧開關作為測量時間的感應器時，須調校一適合的磁場強度範圍來進行測量。
- (四) 利用雷射筆、光敏電阻、反向器設計的光敏開關組具有最精確的測量能力，同時以光的照射進行偵測不需要破壞裝置(簧片開關組需要挖洞)也不用加入磁鐵，配合千分秒的馬錶計時測量，會有相當精確的測量值。
- (五) 在以不同馬錶的時間測量實驗中發現 CASIO HS-20 百分秒的馬錶精確度要小於 CASIO HS-60W 千分秒的馬錶，在由 200cm 自由落下的實驗中兩者測量的標準差相差約 5.9 倍(如表 1-1 所示)，故若是實驗需要較高的精確度的須以千分秒的馬錶作為計時測量工具。

表 1-1：取自(T1-1)之結果以 Microsoft Excel 的標準差函數計算。

墜落高度(cm)	馬錶有效位數(sec.)	標準差
50	1/100	0.00837
	1/1000	0.00167
175	1/100	0.00837
	1/1000	0.00187
200	1/100	0.00894
	1/1000	0.00152

(六) 比較不同感應器設計的測量時間裝置如下(圖 1-2)、(表 1-2)：



(圖 1-2)

表 1-2：自(T1-2)之結果以 Microsoft Excel 函數計算。

感應器	數位攝影組	簧片開關組	磁簧開關組	光敏開關組
標準差	0.01492	0.01028	0.00314	0.00084

由(圖 1-2)、(表 1-2)可看出四種測量方式都有很小的標準差，簡單的設計就可以提升實驗的精確度是值得推廣。由(表 1-2)可看出數位攝影組的標準差較光敏開關組大 17.76 倍，可知光敏開關組較數位攝影組精確很多。而簧片開關組的標準差較光敏開關組大 12.24 倍，得知簧片開關組的精確度高於數位攝影組，但小於光敏開關組。磁簧開關組的標準差又較光敏開關組大 3.74 倍，可知磁簧開關組較簧片開關組精確，但光敏開關組為四者中最精確。即這四種測量方式精確度以光敏感應法 > 磁簧感應法 > 簧片感應法 > 數位攝影法。因此我們選擇光敏開關組做為以下實驗的感應器。

實驗二 由不同測量的方式探討自由落體的速度變化與加速度的測定

十六世紀中，義大利物理學家伽利略，在比薩斜塔上丟下重物，以證明亞里斯多德的理論「重物一定先落地」有誤。我們好奇為何亞里斯多德如此偉大的科學家會這麼犯這麼大的錯誤？我們利用自製的精確測量時間儀器－光敏開關組，回到十六世紀，想再次驗證兩位偉大的科學家有關自由落體的論述。

一、實驗二裝置及步驟：

(一) 架設裝置(如 P2-1、2-2)，以光敏計時器做數組計時器。

(二) 探討墜落距離對加速度 a 值測定之影響：

(1) 分別由上往下於起始 0cm、100 cm、150cm、200 cm 各別裝上光敏開關組設定墜落距離，以圓盤托底平行固定於壓克力管(如 P2-2)

(2) 自壓克力管上端感應點使重物落下，記錄馬錶所顯示之秒數。

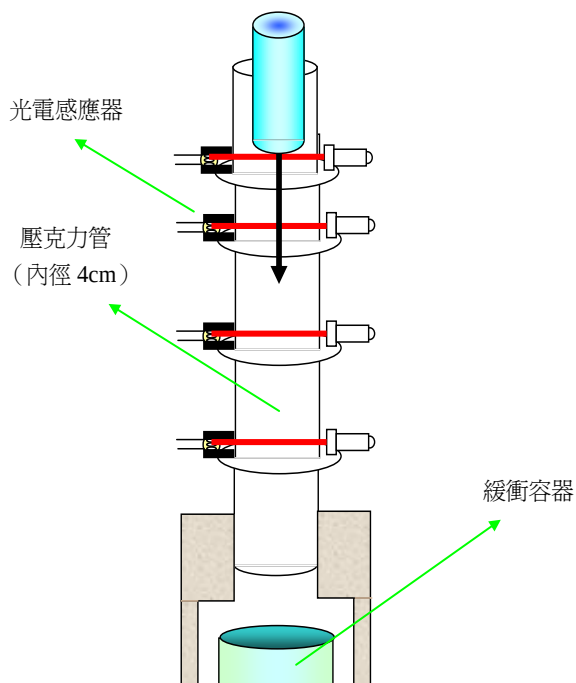
(三) 探討墜落重物底面積（直徑）對加速度 a 值測定之影響：

改變圓柱體重物之底面直徑 20mm、35mm，分別自壓克力管上端感應點使重物落下，記錄馬錶所顯示之秒數。(如 P2-1)

(四) 探討墜落重物質量對加速度 a 值測定之影響：

製作高 15cm，直徑固定之圓柱體重物，質量分別為 100g、200g、300g、400g，墜落距離為 200cm，分別自壓克力管上端感應點使重物落下，記錄馬錶所顯示之秒數。

(五) 交叉比對標定自由落體加速度 a 值測定之固定變因。



P2-1：自由落體實驗裝置示意圖



P 2-2：自由落體實驗實作圖

(六) 利用自由落體合力的關係式：

$$F = W - f \quad (\text{式 2-1})$$

其中 F 為質量 m 的自由落體所受之合力， W 為自由落體所受之重力，系統之所有阻力可為摩擦力 f 。

$$ma = mg - f \quad (\text{式 2-2})$$

將(式 2-2)兩邊同時除以 m 得：

$$a = g - \frac{f}{m} \quad (\text{式 2-3})$$

即若考慮自由落體的阻力，則物體落下的加速度會因為物體的質量增加而增大。

重力加速度(g)為重物在壓克力管中向下運動加速度 a 值加上摩擦力加速度，兩力的淨加速度，其三力關係如下：

$$g = a + \frac{f}{m} \quad (\text{式 2-4})$$

(七) 利用距離－加速度的關係式：

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{式 2-5})$$

s 為上下端光敏感應點長度，初速度 v_0 為零，時間 t 為實驗值，代入上式計算出各不同條件下的加速度 a 值。

由(式 2-5)計算出的加速度 a 值為重物在壓克力管中所受向下的重力加速度(g)與向上的摩擦力加速度，帶入(式 2-4)求出重力加速度 g 值。

二、實驗二結果

(一) 不同墜落高度實驗，測量落下時間(sec.)如下表：

⊕ T 2-1 重物 300g、直徑 35mm 由不同高度墜落，測量落下時間(sec.)。

⊕ 高度(cm)	100	150	200
次數			
1	0.451	0.554	0.643
2	0.456	0.555	0.641
3	0.454	0.557	0.641
4	0.452	0.553	0.644
5	0.452	0.557	0.639
平均時間 t(sec.)	0.453	0.5552	0.6416

(二) 不同重物底面積，測量落下時間(sec.)如下表：

⊕ T 2-2 重物 200g 不同底面積由 200cm 墜落測量落下時間(sec.)。

⊕ 底面直徑	20mm	35mm
次數		
1	0.653	0.642
2	0.634	0.644
3	0.660	0.647
4	0.628	0.639
5	0.631	0.642
平均時間 t(sec.)	0.6448	0.6428

(三) 不同墜落重物質量做自由落體實驗，物體墜落所需時間(sec.)，記錄如下：

T 2-3 不同重物直徑 35mm 由 200cm 墜落紀錄墜落所需時間(sec.)。

次數 \ 重物質量	50g	100g	200g	300g	400g	500g
1	0.661	0.650	0.642	0.643	0.643	0.64
2	0.659	0.643	0.644	0.641	0.642	0.64
3	0.662	0.648	0.647	0.641	0.644	0.639
4	0.640	0.642	0.639	0.644	0.643	0.641
5	0.647	0.649	0.642	0.639	0.645	0.638
平均時間 t(sec.)	0.6538	0.6464	0.6428	0.6416	0.6434	0.6396

三、實驗二討論

- (一) 利用(式 2-5)算出加速度(a)，並利用 Microsoft Excel 函數「STDEV」計算標準差，繪製(圖 2-1)。由(圖 2-1)可得知，墜落高度越高，加速度 a 值下降，且其標準差越小。墜落高度為 200cm 較 100cm 標準差小 0.69 倍。我們認為墜落高度為 200cm 已可大幅減少人為誤差及系統誤差，因此以 200cm 為墜落高度作自由落體實驗。

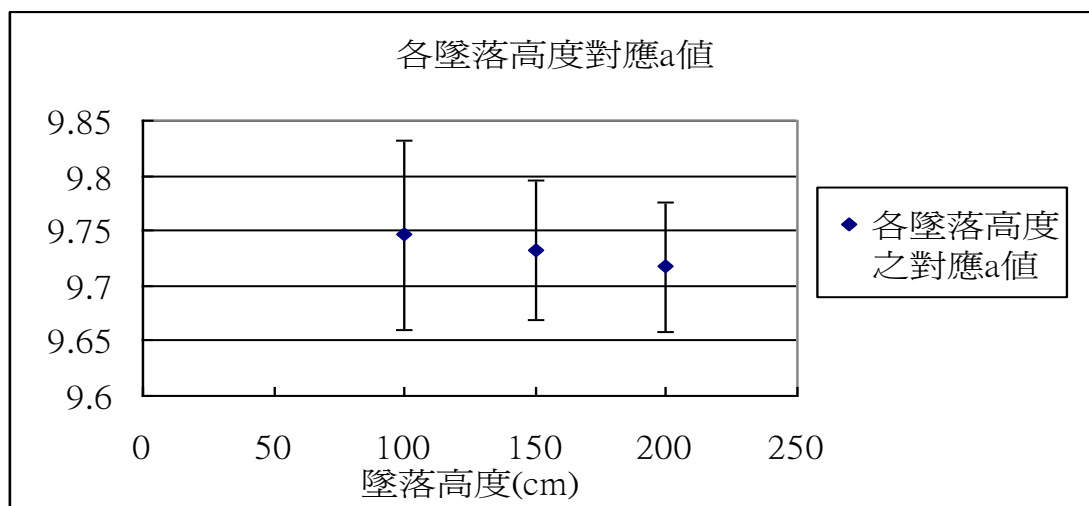


圖 2-1

- (二) 墜落重物底面直徑 20mm 加速度 a 值標準差為 0.430117，比直徑 35mm 的標準差 0.088732 高出 4.8 倍。推測因直徑大，靠管壁較近，所以摩擦力較穩定，使重物垂直向下運動路徑明確；若圓柱重物直徑小，重物向下運動時傾斜機率不一，空氣阻力易改變，導致其 a 值不穩定。因此 35mm 為墜落重物底面直徑做自由落體實驗。

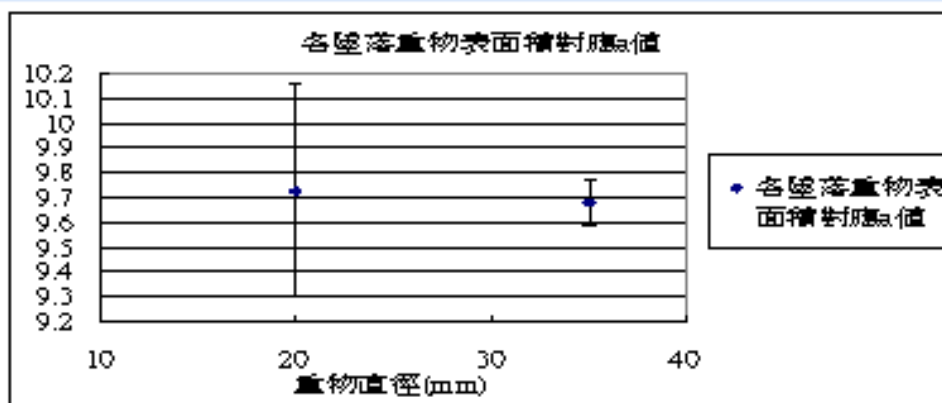


圖 2-2.

(三) 由(圖 2-3)可知，重物質量越大，標準差越小，重物質量 500g 較 50g 的標準差小了 8.12 倍。我們推測重物質量小較易受到外界的變化干擾。我們又由(圖 2-4)發現，物體墜落時不同重物質量改變並不會影響摩擦力，因此可得知物體墜落時其質量不影響摩擦力。

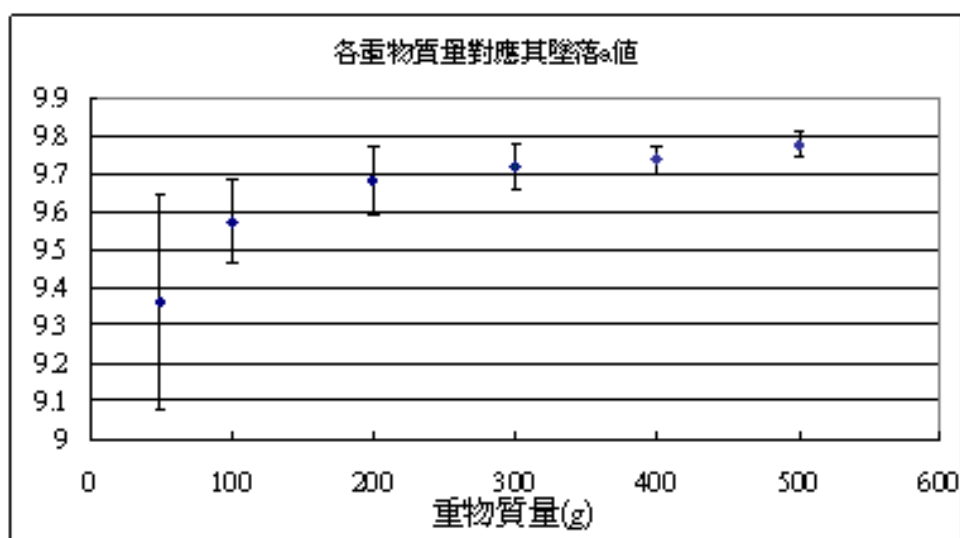


圖 2-3.

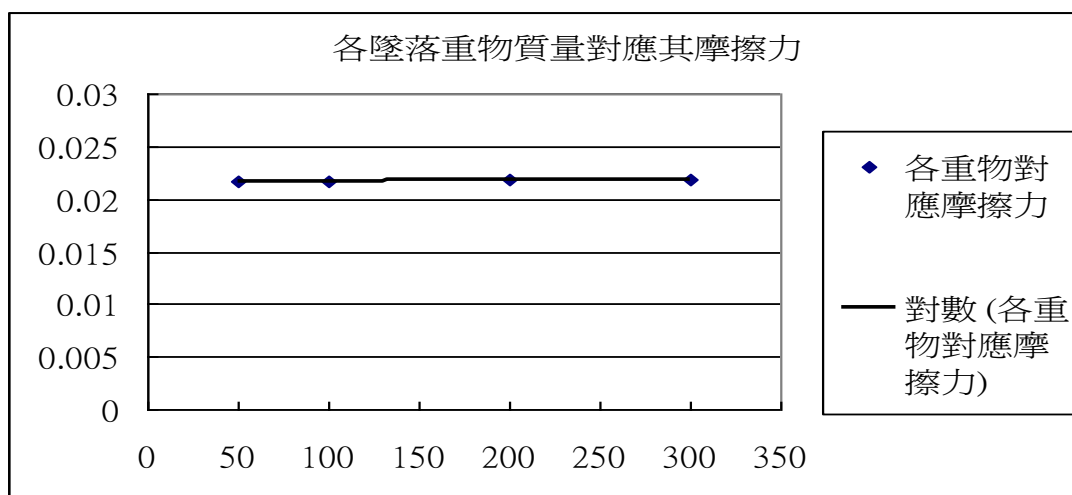


圖 2-4

(三) 西元前三世紀亞里斯多德提出「重物一定先落地」，伽利略卻在 1800 年後提出「物體不管質量輕重都同時落地」理論，推翻了亞里斯多德的理論。我們由公式 2-3 就可以發現，若考慮空氣阻力，質量越大的物體落下的加速度越大，符合亞里斯多德的想法，但是想要看到「質量越大先著地」是件困難的實驗！我們從質量 50、100、200、300、400、500 公克的自由落體落下時間做圖，如下圖 2-5 所示。

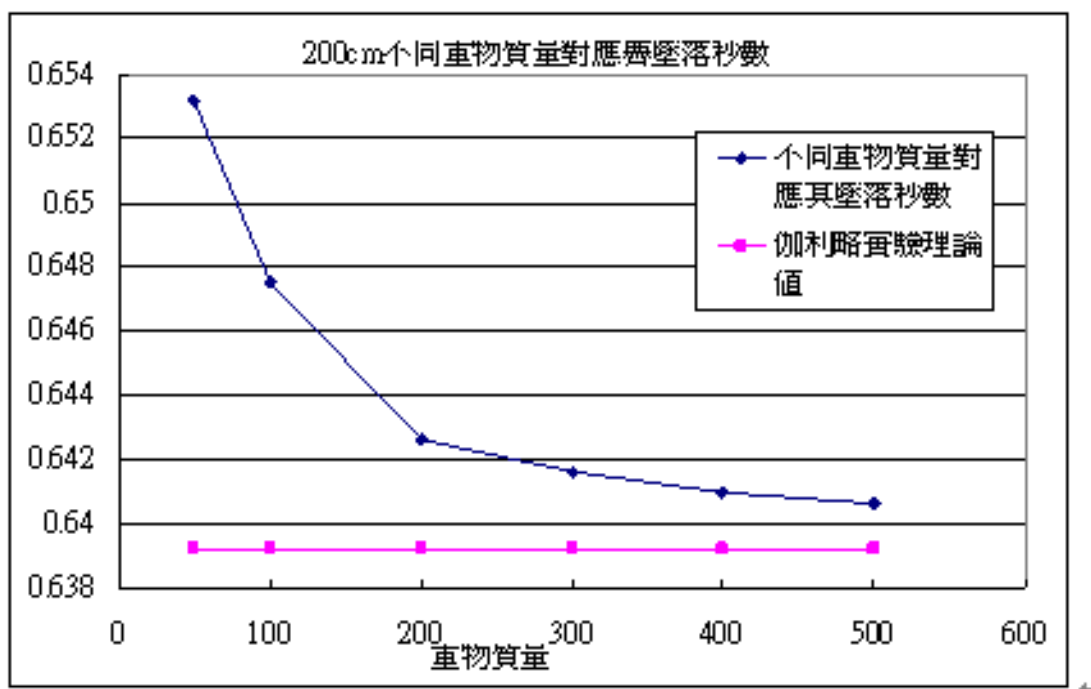


圖 2-5 墜落高度 200cm 對應各重物質質量墜落秒數與理論時間值比較

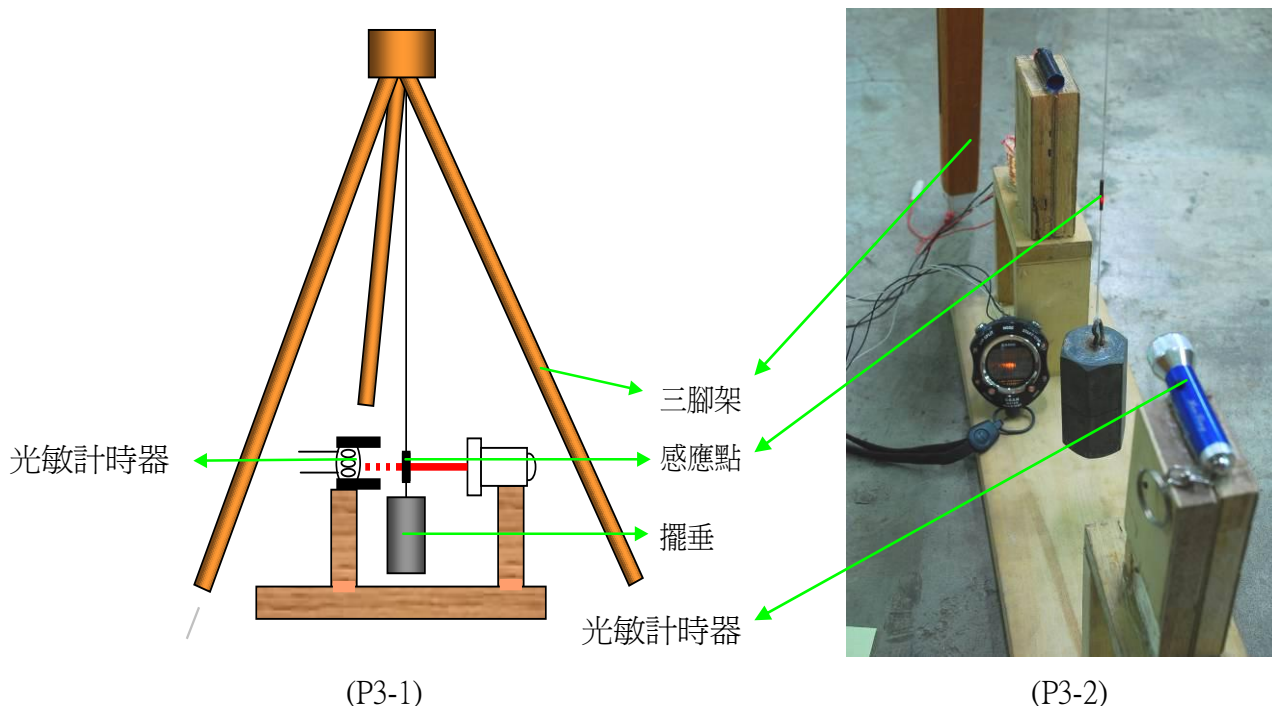
由實驗中發現當墜落重物質質量在 300g 以上重物與不考慮空氣阻力的理論與值落下的時間差只有 0.002 秒，以當時的實驗設備我們大膽的推想：也許伽利略「無論物重皆同時著地」的論點，就是在選擇墜落物重超過 300g 以上的自由落體實驗結果所造成，當兩墜落物重懸殊很大但同時墜落時時間差小於 0.002 秒是肉眼無法判斷出來的。另外亞里斯多德的實驗應以質量較小的物體做自由落體的實驗比較，由圖 2-5 看出；當物體的質量小於 200g 落下時的時間與理論值差約 0.004~0.01 秒之間，可以明顯「看」出物體質量不同墜落時間亦會不同的現象。無論是「物體不管質量輕重都同時落地」的理論，還是「重物一定先落地」的理論，我們看見歷史上這些偉大的科學家從「實驗」的角度做出發，分別做不同解釋的精神與奧妙，真的不是只有記誰說的對與誰說的錯，他們背後求真求是的實驗精神更是值得我們好好學習！

實驗三、利用單擺的擺動探討地球重力加速度 g 值的測量

理化課老師告訴我們地球的重力加速度是 9.8 而且這值會隨地點和高度不同改變。老師像宣教士般的反覆叮嚀，要我們牢牢記住。透過壓克力管的自由落體實驗(實驗二)，我們納悶的是所測得的 g 值從沒有大過 9.8，而且在相同地點測得的 g 值彷彿從來沒有「固定」過，為什麼？會不會是「宣教士」的謊言？最後我們選擇利用單擺擺動配合我們自行設計的計時儀器來測量地球的 g 值，結果讓我們對重力加速度有耳目一新的體認。

一、實驗三裝置及步驟：

(一) 利用以下實驗裝置。使單擺擺動時，感應點經過光敏計時器，使得馬錶記錄出通過時間點，測得單擺擺動所需時間如下圖(P3-1、P3-2)



(二) 改變擺長及擺垂質量以找出最佳測量加速度之單擺

1. 固定擺垂質量一千克改變擺長為一、二、四公尺及固定擺長一公尺改變擺垂質量為一百、五百及一千公克測量 g 值比較標準差。
2. 改變擺動方向：擺垂質量一千公克百長一公尺改變單擺擺動方向為東西向及南北向測量 g 值。
3. 改變測量週期：固定並改變單擺擺動週期為 10、20、25、50 週期。
4. 室內室外之影響：一單擺在室外，另一單擺則在室內且用擋風板圍起同時測量比較其標準差。

(三) 以每個整點為測量基準點，測量單擺擺動時間，利用公式求出加速度 g 值的週期變化。

(四) 從學校海拔為起點，同步測量到 1500 公尺的高度，g 值受高度影響的相對變化。

(五) 利用單擺公式算出單擺測出的重力加速度

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (\text{式 3-1})$$

其中 g 是所算出的重力加速度，T 是測得一週期的時間，L 是擺長

二、實驗三結果

(一) 改變擺長結果

T 3-1 不同擺長及不同時間所測得之 g 值比較

時間	擺垂長度	$g(m/s^2)$		
		1m	2m	4m
08:00			9.7712	9.7708
09:00			9.7700	9.7680
10:00			9.7679	9.7672
11:00			9.7674	9.7669
12:00			9.7656	9.7659
13:00		9.7649	9.7648	
14:00		9.7637	9.7641	
15:00		9.7622	9.7614	
16:00		9.7614	9.7607	
17:00		9.7598	9.7601	

(二) 改變擺垂質量

T 3-2 不同質量及不同時間所測得之 g 值比較

時間	擺垂質量	100 克之 g 值	500 克之 g 值	1000 克之 g 值
09:00			9.7562	9.7587
10:00			9.7606	9.761
11:00			9.7593	9.7612
12:00			9.7629	9.7623
13:00			9.7639	9.7635
14:00		9.7592	9.7612	
15:00		9.7676	9.7648	
16:00		9.7639	9.7637	
17:00		9.7651	9.7658	
18:00		9.7643	9.7676	

(三) 改變單擺週期及地點

T 3-3 在室內、外擺動 10、20、25、50 次求出平均週期再求得 g 值之比較

週期數 次數	10		20		25		50	
	室內	室外	室內	室外	室內	室外	室內	室外
1	9.7622	9.7581	9.7656	9.7756	9.7674	9.7690	9.7674	9.7650
2	9.7680	9.7844	9.7719	9.7635	9.7709	9.7640	9.7651	9.7640
3	9.7680	9.7698	9.7680	9.7601	9.7678	9.7760	9.7676	9.7710

(四) 在學校實驗室測量數天，觀察 g 值的週期變化：

T 3-4 五月十三日(農曆 3 月 27 日)不同時間之 g 值

時間	g 值	時間	g 值	時間	g 值
00:00	9.7807	09:00	9.7562	18:00	9.7614
01:00		10:00	9.7562	19:00	9.7630
02:00		11:00	9.7572	20:00	9.7638
03:00		12:00	9.7585	21:00	9.7656
04:00		13:00	9.7597	22:00	9.7685
05:00		14:00	9.7599	23:00	9.7734
06:00	9.7638	15:00	9.7601	24:00	9.7797
07:00	9.7618	16:00	9.7607		
08:00	9.7591	17:00	9.7614		

T 3-5 六月七日~六月九日(農曆 4 月 22~24 日)不同時間之 g 值

日期	時間	g 值	日期	時間	g 值	日期	時間	g 值
6/7	02:00	9.7651	6/7	18:00	9.7704	6/8	10:00	9.7690
	03:00	9.7640		19:00	9.7698		11:00	9.7700
	04:00	9.7635		20:00	9.7694		12:00	9.7717
	05:00	9.7648		21:00	9.7687		13:00	9.7730
	06:00	9.7658		22:00	9.7680		14:00	9.7731
	07:00	9.7672		23:00	9.7676		15:00	9.7716
	08:00	9.7677	6/8	00:00	9.7672		16:00	9.7702
	09:00	9.7687		01:00	9.7660		17:00	9.7695
	10:00	9.7699		02:00	9.7650		18:00	9.7692
	11:00	9.7705		03:00	9.7646		19:00	9.7690
	12:00	9.7710		04:00	9.7637		20:00	9.7688
	13:00	9.7725		05:00	9.7634		21:00	9.7682
	14:00	9.7738		06:00	9.7640		22:00	9.7683
	15:00	9.7740		07:00	9.7653		23:00	9.7676
	16:00	9.7729		08:00	9.7672	6/9	00:00	9.7667
	17:00	9.7720		09:00	9.7684			

(五) 分兩組測量，一組固定在學校與另一組從學校到海拔 1500m 同時測量不同高度對 g 值之影響：

T 3-6 學校到沿縣道「竹 60」上去不同高度所測得之 g 值

測量高度	不同高度測得 g 值	學校當時測得 g 值(78m)	測量高度	不同高度測得 g 值(78m)	學校當時測得 g 值
400m	9.7566	9.7632	1000m	9.7438	9.7708
500m	9.7534	9.7670	1300m	9.7379	9.7749
800m	9.7487	9.7675	1500m	9.7333	9.7747

(六) 測量不同擺動方向對 g 值之影響

⊕ T 3-7 兩單擺同時以東西向及南北方向擺動所測得之 g 值

擺動方向 \ 次數	1	2	3	4	5
東西	9.7796	9.7796	9.7801	9.7798	9.7801
南北	9.7786	9.7775	9.7777	9.7791	9.7786

T 3-8 兩單擺同時以南北向擺動所測得之 g 值

擺動方向 \ 次數	1	2	3	4	5
南北	9.7798	9.7786	9.7786	9.7781	9.7782
南北	9.7786	9.7780	9.7790	9.7798	9.7794

三、實驗三討論

- (一) 將 T3-1、T3-2 中的五組 g 值利用 Excel 函數中的 STDEV 算標準差得如下表 3-1 及表 3-2。由(表 3-1)及(表 3-2)可以得知四公尺、兩公尺及一公尺擺長之單擺測得之 g 值標準差均為 0.0016 左右，故我們選擇架設較方便之一公尺擺長單擺來探討有關單擺之實驗，而在改變擺垂質量的部分一千克之標準差小於其二者，故選擇擺長一公尺擺垂質量一千克為最佳測量 g 值之單擺。

表 3-1 單擺擺垂重 1000g 改變不同擺長實驗之標準差。

擺長(cm)	100	200	400
標準差	0.00198	0.00210	0.00185

表 3-2 單擺擺長 100cm 改變不同擺垂質量實驗之標準差。

擺垂質量(g)	100	500	1000
標準差	0.00305	0.00239	0.00178

- (二) 由 T3-3 可得知單擺實驗當須很精密測量時，室外會對單擺的實驗影響應來自室外的空氣流動引想所造成，其標準差間的差異如圖 3-1 所示。有擋風板時標準差較小，此亦提醒戶外實驗時要格外留意風及空氣的對流。而測量組數越多其標準差越小，故在作重力加速度測定時架設擋風板及每次測量組數為 50 組平均。

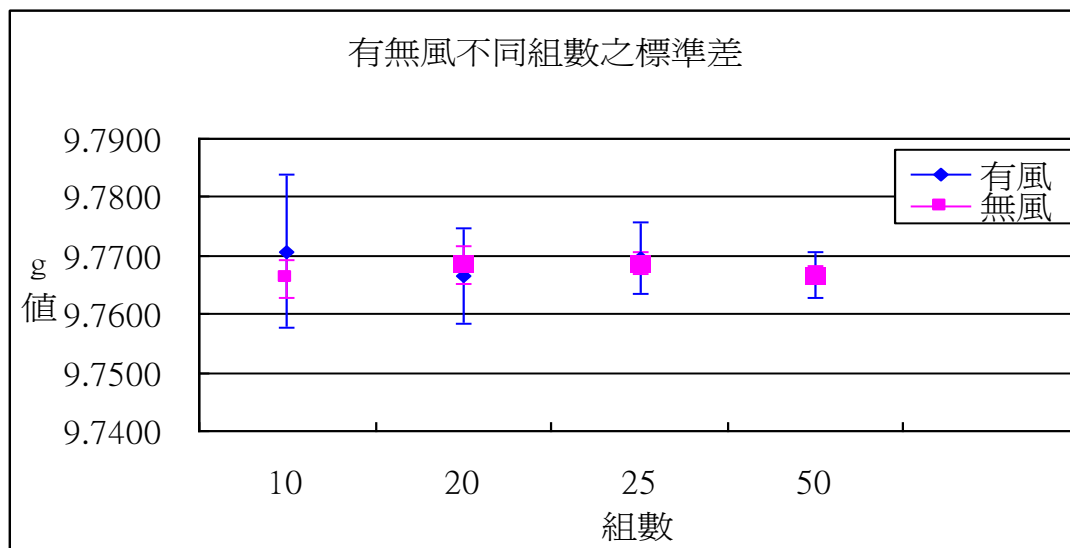


圖 3-1 室內(無風)與室外(有風)的測量差異

(三) 理化課本中雖說相同地點會有相同重力加速度，但由 T3-4 的實驗結果將 g 值對一天的時間來做圖發現如下圖 3-2。可得知重力加速度並不會因固定地點而固定不變，實驗發現 g 值會隨著時間改變而有週期性的變化。我們推測是潮汐變化所造成的影響，因此利用 GPS 的軟體查詢當天潮汐繪製出圖 3-3，由此圖得知潮汐和重力加速度沒有直接關係。從圖 3-2 可看出一天重力加速度變化約為一個週期，推測重力加速度之改變與月球相對位置有關圖 3-2 地球、月亮、太陽相對位置所示，由此圖可看出當天正午月球在單擺正上方時會測得重力加速度之極小值，而在午夜 12 點左右月亮在單擺正下方時則會測得重力加速度之極大值，此推論與圖 3-2 的實驗值相當吻合。

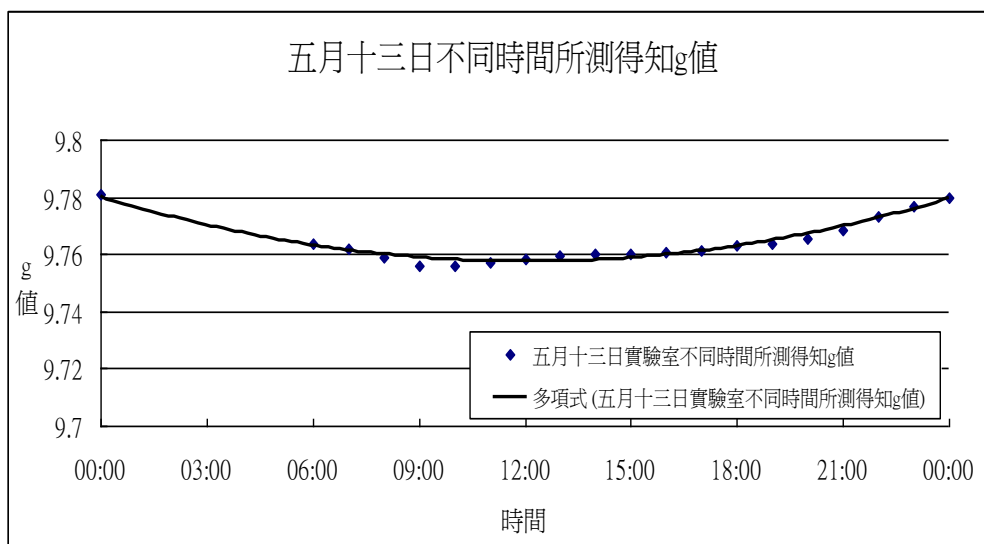


圖 3-2 五月 13 日(農曆 3 月 27 日)當天 g 值的週期變化與地球、月亮、太陽的相對位置。

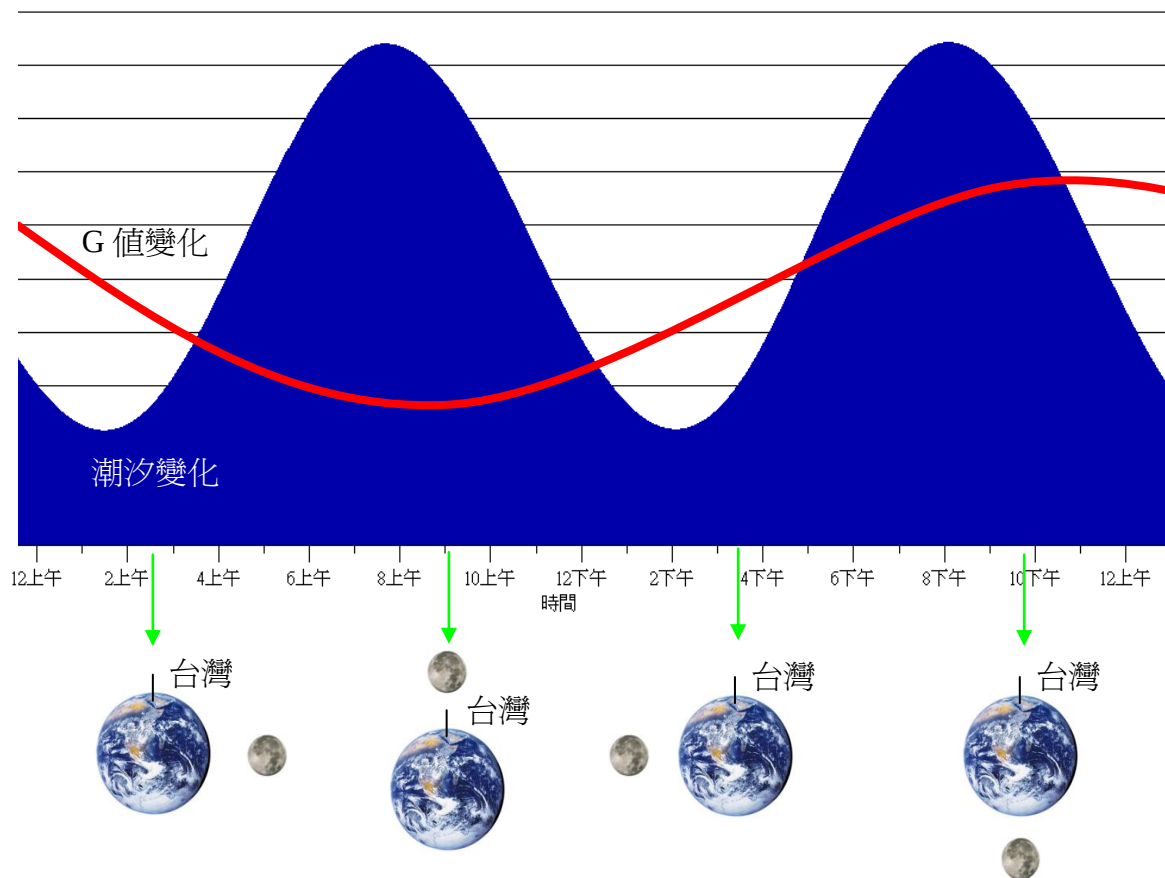


圖 3-3 五月 13 日(農曆 3 月 27 日)當天 g 值的週期變化配合潮汐及月亮相對位置。

(四) 由於月球會影響重力加速度，因此我們從 6 月 7 日到 9 日(農曆 4 月 22~24)連續觀察三天將結果 T3-5 繪製成圖 3-4，如下圖 3-4 所示可以觀察到三個週期的 g 值變化，不同的是此時因月亮的位置與太陽約成 90 度角，故 g 值的極大極小值分別在傍晚 4~5 點及清晨 4~5 點。

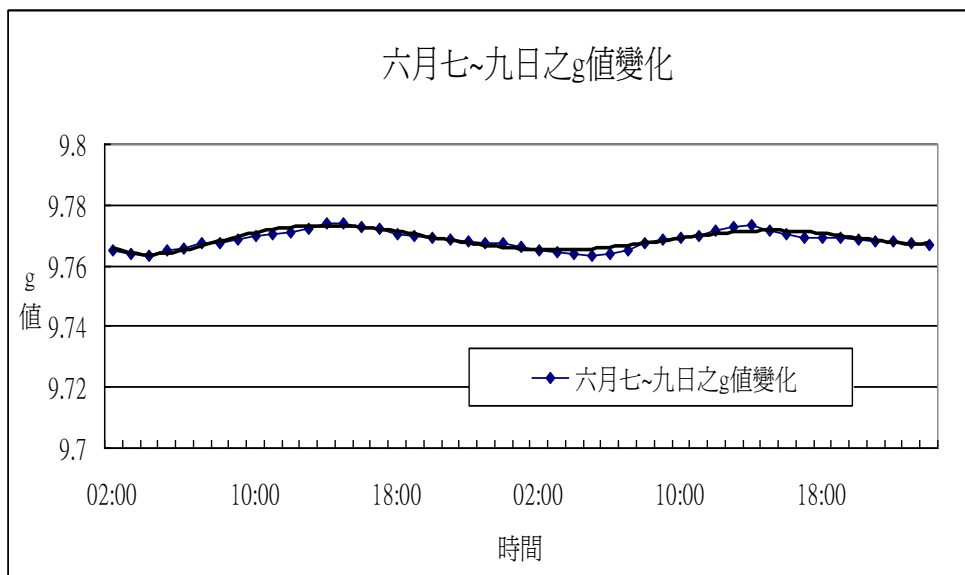


圖 3-4 六月 7~9 日(農曆 4 月 22~24 日) g 值的週期變化與地球、月亮、太陽的相對位置。

(五) 選定 5 月 13 日及 6 月 8 日(農曆二十七及二十三)月球、太陽及地球關係圖如圖 3-5 所示。在這兩天做重力加速度測定繪製出(圖 3-2) (圖 3-4)了解太陽是否會影響測得之重力加速度，由二圖發現 5/13 月亮在台灣的正上方時為接近中午剛好與太陽同一個方向其 g 值的極小值為 9.7562，6/8 時月亮在台灣正上方為早上 5 點多此時的 g 值為 9.7634 由這兩天曲線的極大值和極小值差異性可以推測太陽也會影響重力加速度，但還是以月球的影響力大於太陽，月球對重力加速度之影響較太陽約大 2 倍。

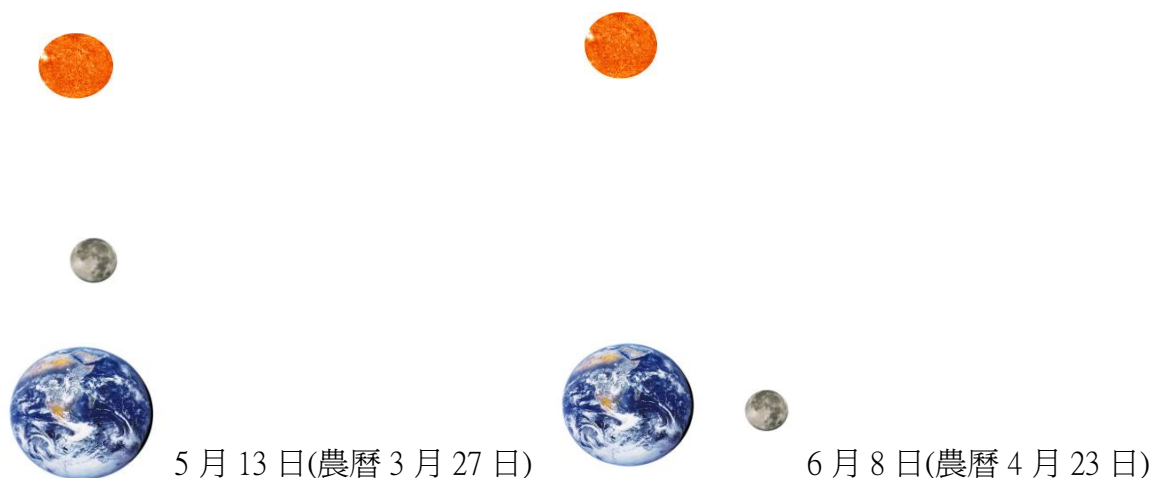


圖 3-5 選定 5 月 13 日及 6 月 8 日(農曆二十七及二十三)月球、太陽及地球關係圖。

(六) 考慮單擺擺動的方向實驗結果 T3-7、T3-8 發現當要精確的測量 g 值，與擺動的方向有關。將 T3-7.3-8 繪成圖 3-6。在圖 3-6 中可以看出東西向擺動的單擺無論是實驗組還是對照組都有相同的 g 值變化，原因是因為南北向與月亮呈直角如圖 3-7 所示，故不影響 g 值。但是東西向擺動的單擺則有兩種差異；如圖 3-6 所示，18 點時的 g 因月亮的位置在單擺的側邊(如圖 3-8)讓 g 值小於南北向擺動的單擺。當在零點左右時太陽及月亮均在單擺正下方，固東西向擺動及南北向擺動不會有差異，推知當月球及太陽在單擺的側邊時，會造成東西向單擺測得重力加速度與理論值造成 0.0131 的差別。

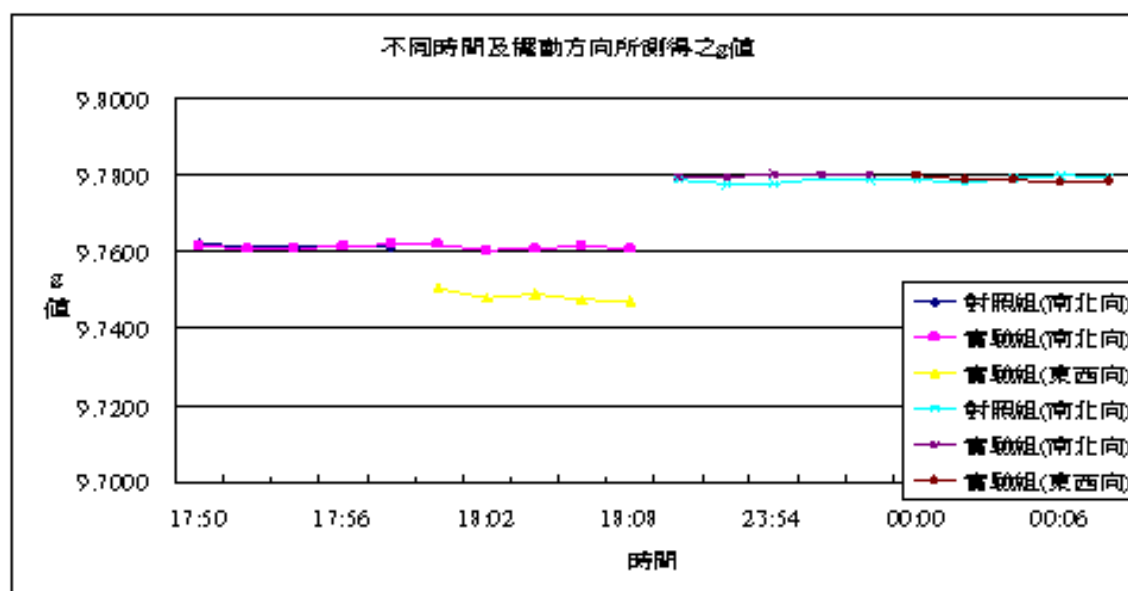


圖 3-6 單擺不同擺動方向(東西、南北向) g 值的變化。

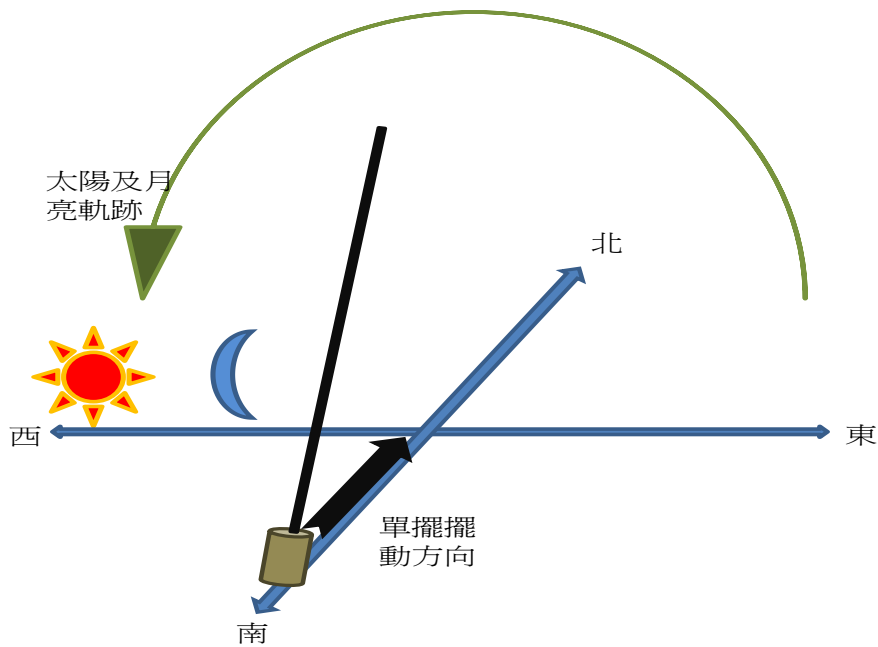


圖 3-7 南北向擺動的單擺與月亮、太陽運行位置示意圖。

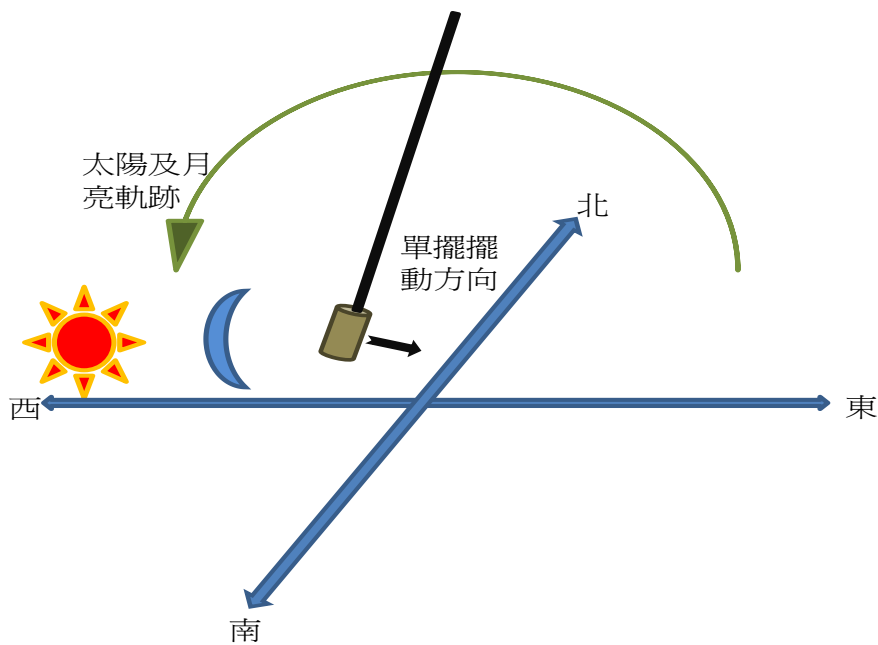


圖 3-8 東西向擺動的單擺與月亮、太陽運行位置示意圖。

(七) 將高度變化與 g 值的實驗結果 T3-6 繪成圖 3-9 可知，當海拔高度從 400 公尺上升至 1500 公尺時，同時比對持續在學校進行測量的對照組發現 g 值從 9.7566 下降到 9.7333，而在海拔 78 公尺處(學校)， g 值則是隨著時間變化而上升(月亮向頭頂移動中)，與一天重力加速度變化相符。我們推測在山區 g 值較小是因相較於平地和地心的距離較遠，所以引力較小，造成重力加速度會小於平地。

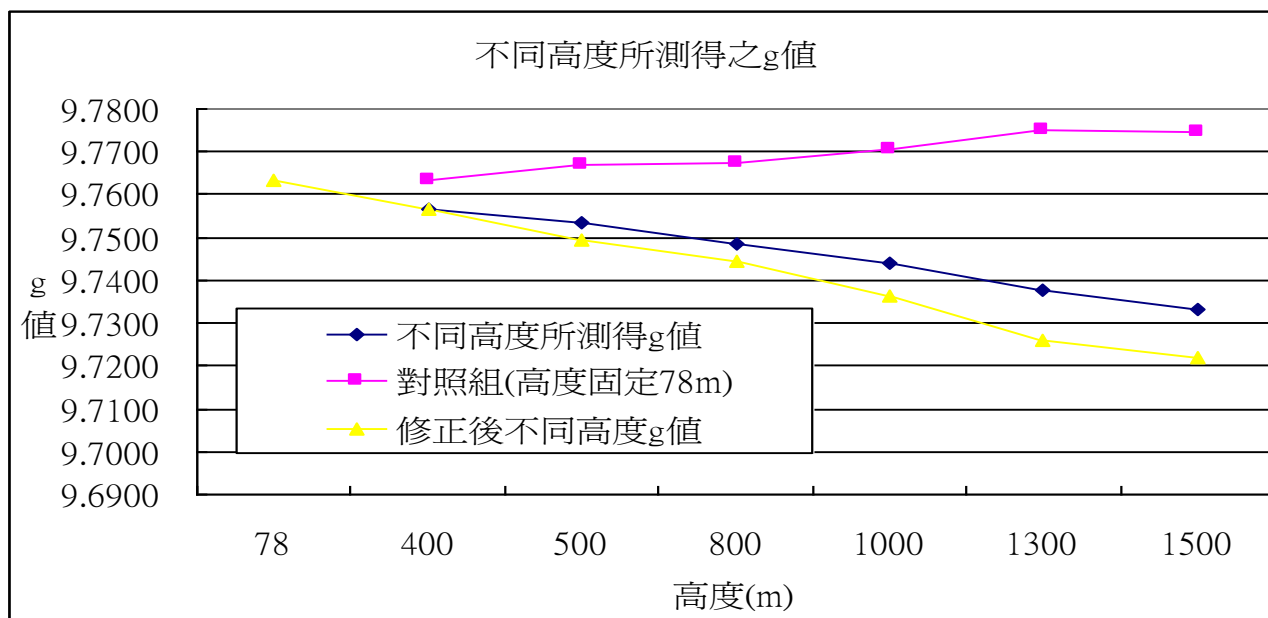


圖 3-8 從學校(78m)到海拔 1500m 測量 g 值的相對變化。

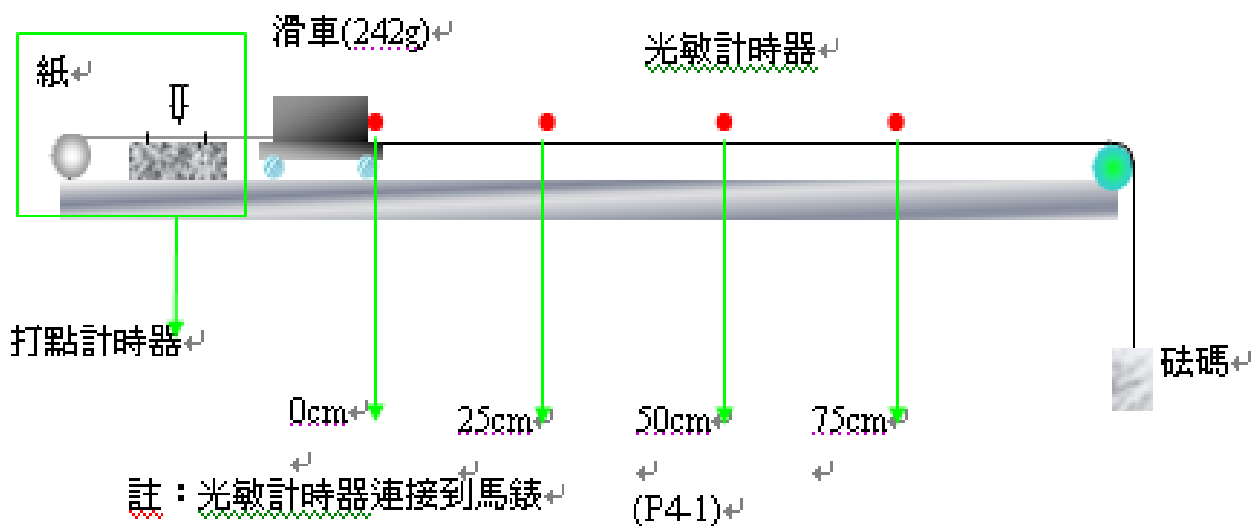
實驗四 將自製的精密計時裝置應用在理化實驗課程的探討

我們在實驗一提到，理化實驗都是用手按馬錶，但不同人測出來的數據往往差很多，因此我們將光敏計時器拿去做一些國中生會做到的實驗，試圖改善國中生作實驗的方式。

一、實驗四裝置及步驟：

(一) 滑車實驗

1. 利用以下實驗裝置圖(P4-1)，砝碼質量 100g 選用三種計時方式(方式 I、II、III)進行滑車加速度測量實驗。
1. 利用以下實驗裝置圖(P4-1)，砝碼質量 100g 選用三種計時方式(方式 I、II、III)進行滑車加速度測量實驗。



方式 I 傳統測量方法：測量打點計時器之頻率(手按馬錶)，再由紙袋上各點距離算出速度及加速度。



方式 II 在方式中加設光敏計時器：精確測量滑車時間，再由紙帶推算出速度與加速度。



方式 III 光敏計時器：不需要打點計時器，可直接測得精確時間算出加速度。



2. 利用同週期公式(式 4-1)及運動學公式(式 4-2、式 4-3)分別算出不同測量方法計算出的加速度 a 值。

$$T = \frac{t}{x} \quad (\text{式 4-1})$$

$$V = \frac{S}{\Delta t} \quad (\text{式 4-2})$$

$$a = \frac{V_2 - V_1}{\Delta t} \quad (\text{式 4-3})$$

T：打點計時器的週期

t：時間(秒)

x：打點計時器打出的點數

V：平均速度

S：紙帶上兩點間的距離

Δt ：兩次打點所經過的時間

a：加速度

3. 利用牛頓第二運動定律算出滑車系統重力加速度的摩擦力

$$a = \frac{m}{M + m} g - \frac{F}{M + m} \quad (\text{式 4-4})$$

其中 a 是所算出的重力加速度，g 地球的重力加速度(新竹為 9.79)，M 是滑車的重量，m 是重物的重量，求出系統的摩擦力 F。

4. 利用方式 II、III 分別測量砝碼為 200g、300g、400g 時的加速度。

二、實驗四結果：

1. 砝碼=100g 用方式 I~III 測量滑車之加速度 a 如下表(T 4-1)

實驗組 計時方式	算出之頻率(Hz)	第一組 a 值(m/sec ²)	第二組 a 值(m/sec ²)	a 值標準差
方式 I	46.6	2.3541	1.9312	0.29904
方式 II	59.3	1.2678	1.2396	0.01994
方式 III		2.0538	2.0325	0.01506
理論值		2.8626		

(T 4-1)不同測量方式(I~III)100g 之 a 值比較表。

2. 不同重量

重物 數據	a 值(m/sec ²)		
	方法 II	方法 III	理論值
100g	1.2678	2.0538	2.8626
200g	2.9895	3.4702	4.4299
300g	4.1069	4.3592	5.4188
400g	*	5.0348	6.0997

*400g 時打在紙帶上的點已拉長成一直線。

(T 4-2) 不同重量及測量方式(II~III)及之 a 值比較表。

三、實驗四討論：

- (一) 下圖示由(T 4-1)不同測量方法之加速度值繪製出

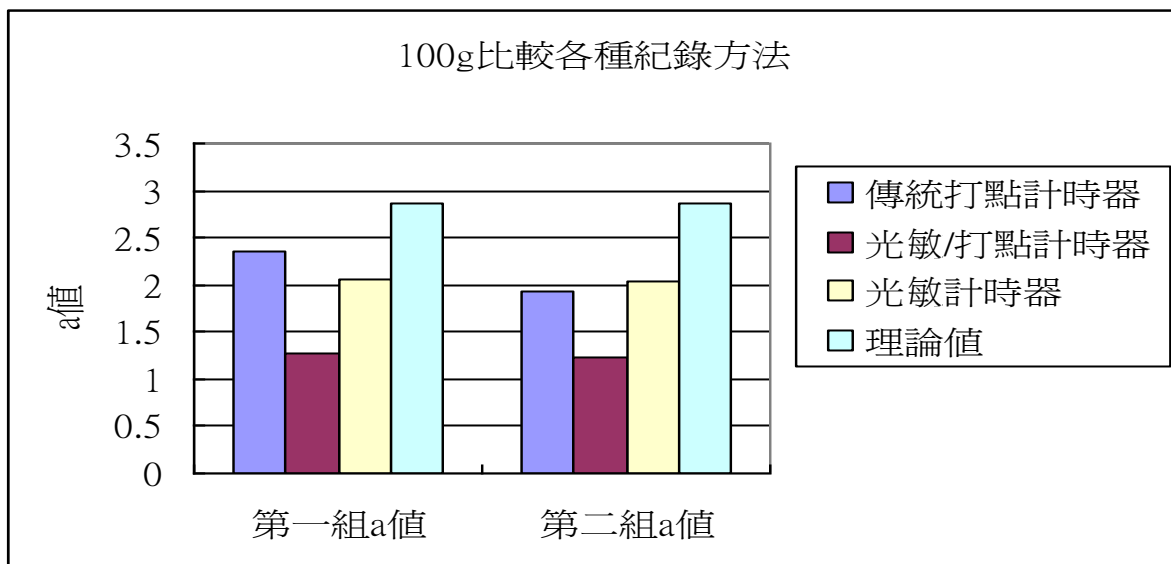


圖 4-1 不同計時器所算出 a 值之比較圖表。

國中生我們都使用方法 I 進行滑車實驗，標準差極大，而利用方式 II 和方式 III 標準差都較低約 15 倍，這表示光敏計時器及打點計時器都能很穩定的測量加速度。方式 II 加速度值較方法 III 低，我們推測二者差為打點計時器打點在紙帶上所產生的摩擦力，因此我們的實驗裝置不只可測量時間，還可測量摩擦力。

(二) 下圖是由(T 4-2)的不同質量及測量方法之加速度值會製出

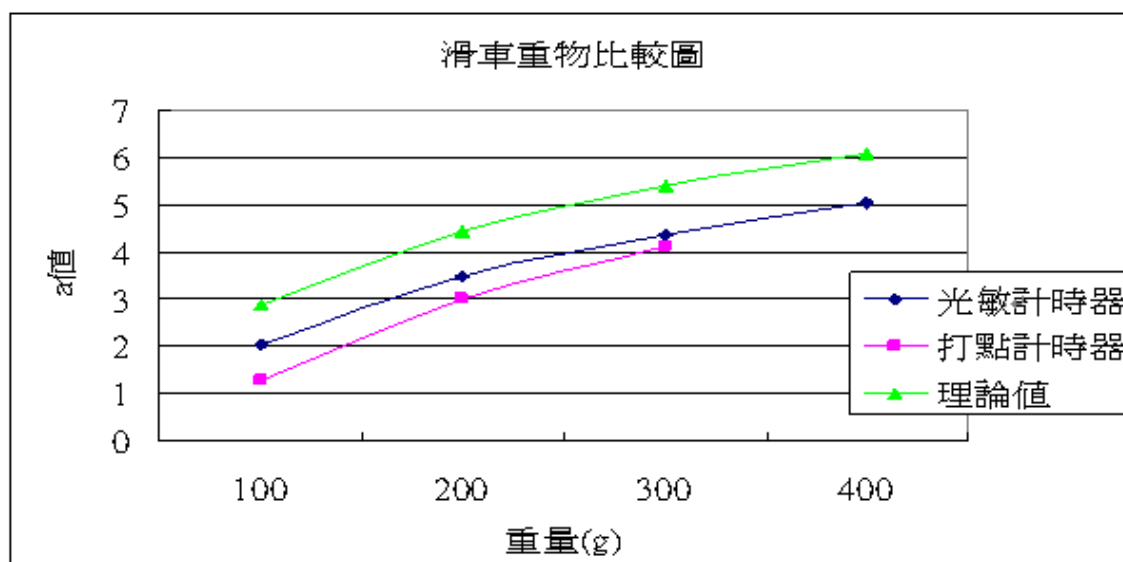


圖 4-2 不同質量及測量方法之加速度值比較圖

(三) 由(圖 4-2)可得知，兩者測量出的曲當紙帶移動太快時，打點計時器打出來的點已無法辨識，因此有一個測量上限，而直接改變測量方法(方法 III)測量則沒有。

(四) 若直接利用效能最好的光敏計時器測量滑車的加速度，僅需 380 元。而效能較差且摩擦力較大之打點計時器卻要價 550 元。因此作此實驗僅需利用我們設計光敏計時器即可。

伍、 綜合討論

- 一、光敏計時器精確度較高，且當光源被遮斷時，會停止計時，利用此特性可改良理化課實驗裝置，如可以廣泛運用在運動學的速度與加速度的測量，亦可應用於理化中化學方面的實驗研究上，如反應速率的測定、濁度的測量等等。
- 二、上述實驗二與實驗三中，都可分別以自由落體裝置與單擺擺動測得重力加速度，我們選定一天同步以兩者裝置分別測量 g 值，如下表 5-1 所示。

項目 時間	自由落體					單擺
	1	2	3	t (秒)	加速度	加速度
10:00	0.641	0.643	0.64	0.641333	9.7562	9.798062
11:00	0.644	0.64	0.641	0.641667	9.7572	9.78796
12:00	0.64	0.646	0.639	0.641667	9.7585	9.78796
13:00	0.644	0.639	0.641	0.641333	9.7597	9.798062
14:00	0.641	0.643	0.638	0.640667	9.7599	9.818312
15:00	0.644	0.638	0.642	0.641333	9.7601	9.798062

表 5-1 同步以單擺、自由落體測量 g 值的變化。

測定比較後發現：自由落體與單擺的 g 值測定，雖實驗時間同步紀錄實驗秒數如圖 5-1，自由落體測得之 g 值，其值偏高且飄忽不定，雖可以從趨勢線發現些微潮汐變化，但以其標準差而言，潮汐變化可能只是誤差。而單擺 g 值穩定，且隨月亮位置加速度 g 值平穩上升，所以以單擺擺動為最佳測定 g 值裝置。

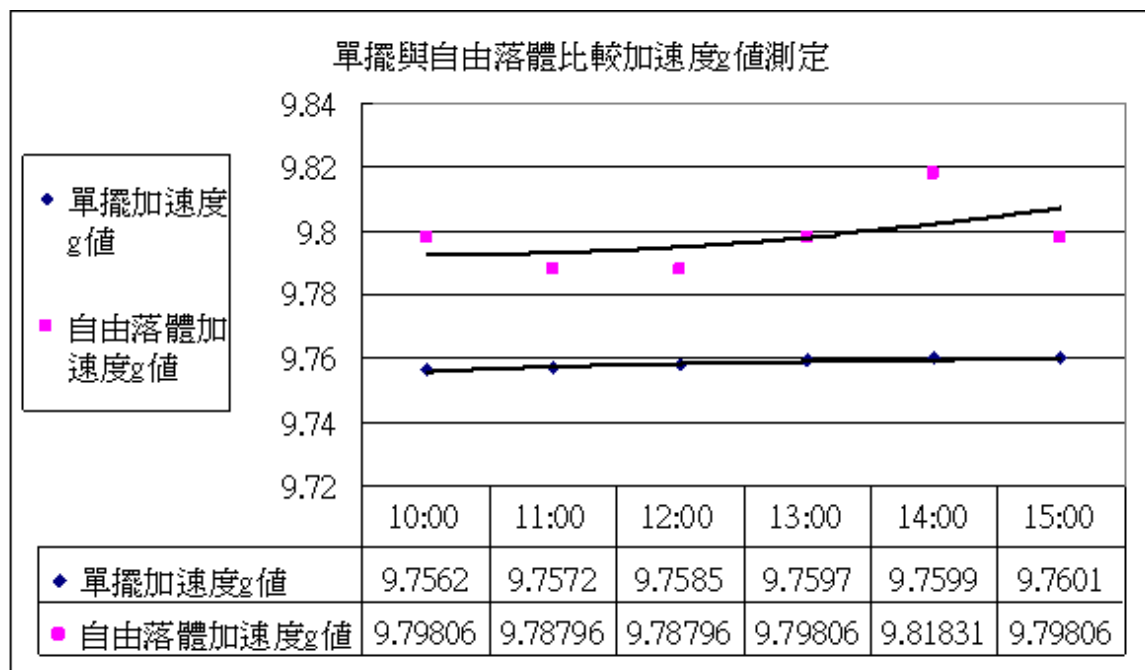


圖 5-1 5/13 自由落體裝置與單擺擺動對加速度 g 值測定之比較，單擺擺動裝置較自由落體裝置完善， g 值穩定

陸、 研究結論

- 一、四種自行設計的計時方式皆可有效提高理化實驗的精確度。四種方式以利用簡單的電子元件及電路設計可增加碼表的計時精確度 15 倍以上，又配合較精密的馬錶則可觀察更細微的實驗變化。
- 二、自組四種測量時間的計時感應器，皆具有操作方便、測量精密與實用性，其中同步攝影法適合低速運動物體的測量，簧片、磁簧及光敏感應三組裝置適合高速運動的物體測量簧片感應組雖會因撞擊簧片而有較大誤差但以接觸來啟動開關的方式方便起始的操作，磁簧感應組不須靠接觸啟動開關有較小摩擦，但運動物體的磁場須在一定的範圍才能有效感應。光敏感應組因利用雷射光做感應測量所以不需碰觸物體感應，對測量物的運動毫無干擾，又感應光束可在 2 毫米以內的範圍測量，具優異的精確度，應用範圍更廣泛。其中又以光敏感應法的測量精確度 > 磁簧感應法 > 簧片感應法 > 數位攝影法。
- 三、自由落體實驗中發現增加墜落高度、墜落物質量、墜落物底面直徑，所測得之結果精確度較高。故裝置以高度 200 公分、重物質量 300 公克、直徑 35 毫米，精確度為最佳自由落體裝置，其測得之加速度有效精準位數為小數點後兩位。
- 四、自由落體實驗中，發現重物質量越大，所測得之加速度 a 值越大。
- 五、測量不同質量的自由落體實驗考慮實際阻力存在的情況下發現質量越大落下的速度越快，此現象當物體質量小於 200 公克時可以明顯測量出，推論亞里斯多德「重物一定先落地」的實驗即在此條件下測量出的結論。當墜落物質量大於 300g 以上，墜落的時間差小於 0.0015 秒以下不易觀測出，因此推論伽利略「重物質量不影響墜落時間」的實驗應是在較大質量的實驗操作結果。
- 六、擺垂質量一千公克、擺長一公尺為最佳測量加速度 g 值之單擺，其精確度可測到 0.001 之 g 值變化，重力加速站精密的單擺裝置可測到 0.0001 之 g 值變化，利用簡易的單擺裝置亦可大約達到相同結果。
- 七、相同地點加速度 g 值變化若以傳統的測量方式看不出 g 值的變化，但以本裝置可測出 g 值變化，此實驗發現 g 值的變化與月亮的位置有密切的關係，其 g 值變化一週期約為一天，最大及最小 g 值相差 0.02，月球位置變動可造成 g 值 0.02 之改變。
- 八、東西向擺動的單擺當月亮的位置剛好在單擺的兩側時會影響 g 值，使 g 值下降約 0.00131 故當進行測量時若要避免此影響，則建議以南北方向擺動就不會受此因素干擾。
- 九、由我們自製單擺裝置可精密測得海拔 78 公尺上升到 1500 公尺加速度 g 值會下降約 0.0414 故加速度會隨著高度增加而減少。
- 十、在滑車實驗中利用改良方法較傳統的方法所測得之 a 值標準差之準確度上升 15 倍。而打點計時器的摩擦力與滑車本身的摩擦力大略相同。
- 十一、利用簡單電子元件製作出精密的光敏感應器所需材料約為 380 元，而市售的光電計時器價格約為 1~4 萬元，為自製光敏計時器之 25~100 倍。

柒、參考資料

- 一、 http://en.wikipedia.org/wiki/G_force
- 二、 <http://en.wikipedia.org/wiki/Tides>
- 三、 <http://en.wikipedia.org/wiki/Zenith>
- 四、 <http://en.wikipedia.org/wiki/Syzygy>
- 五、 http://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_force
- 六、 <http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1506122207843>
- 七、 <http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1105041602116>
- 八、 <http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1006121301803>
- 九、 www.syrhs.tp.edu.tw/t109/star/00-aa13.htm
- 十、 skytonight.com/observing/objects/planets/3308506.html?page=1&ec=y
- 十一、 http://www.nga.com/Geo_ser_Gravity_tech.htm
- 十二、 <http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitation#column-one>
- 十三、 <http://tw.knowledge.yahoo.com/question/question?qid=1206101200777>
- 十四、 新竹市第二十二屆中小學科學展覽會國中應用科學組；磁鐵在非鐵金屬管中的磁浮現象與應用
- 十五、 科學發展 409 其 72 頁~77 頁 萬有引力

它抓得住我－以自製精密計時器探討"g"世界的奧妙

【評語】 031613

1.自行改裝馬錶能同步量測，具有創新之科學態度，從多日量測發現 g 值的週期性些許變化，因而聯想到月球對單擺的週期作用，具有創新及科學思考的探究精神，合乎科展的旨意。

2.能從細微的 g 值週期變化連接到潮汐作用，具有大膽創新的科學探究態度。