

普通物理實驗創新 - 利用手機 APP 驗證馬呂士定律

謝怡靜 江俊明*

逢甲大學 物理教學研究中心
*通訊作者：cmchiang@fcu.edu.tw

(投稿日期：民國 106 年 10 月 12 日，接受日期：106 年 12 月 25 日)

摘要：本文主要是利用手機的 APP 程式，來進行普通物理實驗-驗證馬呂士定律。為瞭解光偏振的含意，可利用在光感應器及偏振片來觀測光的偏振特性，進而驗證馬呂士定律(the law of Malus)。我們透過使用手機 APP 免費軟體(LightMeter)替代傳統昂貴的光照度計並搭配偏振片，即時描繪出光照度與偏振片角度的變化關係圖，透過這樣便宜又簡單的實驗裝置，能使老師更為容易地傳達關於光偏振的物理知識，學生也能輕鬆的驗證馬呂士定律，並藉此培養其數值分析處理的能力。

關鍵詞：APP、馬呂士定律、偏振片

壹、前言

目前智慧型手機因體積小、功能多已經非常普及，絕大部分的智慧型手機都有內建幾種感測器，例如：加速器、溫度、磁場、亮度、距離等…，使得行動式的科學測量或實驗變得易於實現，利用這樣的便利性，學生可以下載免費的 APP 簡單地量測並驗證定理，提高學習的主動性。

近來有一些討論如何利用手機的 APP 程式，來進行物理實驗的文章[1-3]，本文將以這些文章為基礎，發展出如何利用 APP 來執行創新普通物理實驗的實施方法，並以驗證馬呂士定律作為實驗設計。首先我們介紹偏振光與非偏振光如何檢驗並由實驗結果證明馬呂士定律[4]，討論偏振光入射偏振片，透射光強與入射光強之間的關係。接下來介紹傳統實驗裝置[5]與此次實驗裝置的差異與改良，最後針對實驗方法的優缺點作分析，並驗證實驗結果與理論值的一致性。

貳、原理介紹：偏振光與馬呂士定律

光是一種電磁波，一般的自然光線在前進時，電磁場在空間中振動方向是隨機均勻的在垂直光前進方向的平面上振動。如果光的電磁場振動方向只發生在某一特定方向，亦即電場與磁場振動方向固定的光稱為偏振光。習慣上我們定義電場振動方向稱為光的偏振方向。因為人的肉眼無法分辨偏振光與非偏振光，所以必須以偏振片來檢驗，偏振片可來選擇某一特定方向之偏振光，已偏振化的光再經過一個偏光片時可全部通過或部分通過，視第二個偏光片的方向而定。

馬呂士定律(Malus's law)表明，經過起偏片的偏振光，進入檢偏片後(在前面最先接觸入射光線的第一塊偏振片稱為「起偏片」，在後面的第二塊偏振片稱為「檢偏片」，相同的東西，只是用途不同而給予不同命名)，若偏振光的振動方向與檢偏片之易通過軸夾 θ 角時，通過偏振光的光強度關係可表示為 $I = I_0 \cos^2\theta$ ，即通過檢偏片的光強度與 $\cos^2\theta$ 成正比。其中， I_0 是入射偏振光的強度， I 是通過檢偏片後之強度。

由上面馬呂斯定律可以得知，當夾角為0度時($\theta = 0^\circ$)，所有的偏振光均可以自檢偏片通過所以強度並不改變($I = I_0$)；但是當夾角為90度時($\theta = 90^\circ$)，可以發現通過檢偏片之光強度為零($I = 0$)，代表著當起偏片與檢偏片的軸互相垂直時，光線將無法通過檢偏片。因此，本實驗在一開始可改變起偏片的不同角度找到最大亮度值，再放上檢偏片改變兩者的夾角，觀測亮度的變化如圖1。

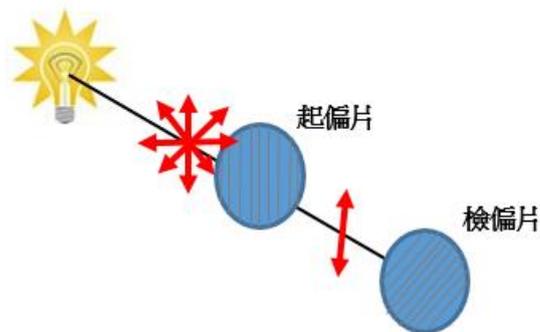


圖 1：起偏片與檢偏片

我們知道照明常用術語有光通量、光強度、光照度，其相關的定義與單位如下：

1. 光通量(Luminous flux)，單位為：流明(lumen, lm)，光源所發出的光能是向所有方向輻射的，對於在單位時間裡通過某一面積的光能，稱為通過這一面積的輻射能通量。
2. 光強度(luminous intensity)，單位：燭光(candela, cd)，係指從點光源一個立體角(單位為 sr)所放射出來的光通量，也就是光源或照明燈具所發出的光通量在空間某選定方向上的分佈密度。
3. 照度(illuminance)，單位：勒克斯(lux)，照度為單位面積內所入射的光量，可用每一單位面積的光通量來測量。

光照度可用照度計直接測量，即為本實驗利用 APP 驗證馬呂士定律，量測所使用的單位。

參、實驗設計與方法

傳統實驗方法

如圖 2 所示，傳統實驗的裝置是以鎢絲燈為光源，讓光入射至起偏片形成偏振光，再將檢偏片作 0~90 度的變化，即量測起偏片與檢偏片之間的夾角，由光敏電阻感應光的大小，三用電錶讀出電阻值。

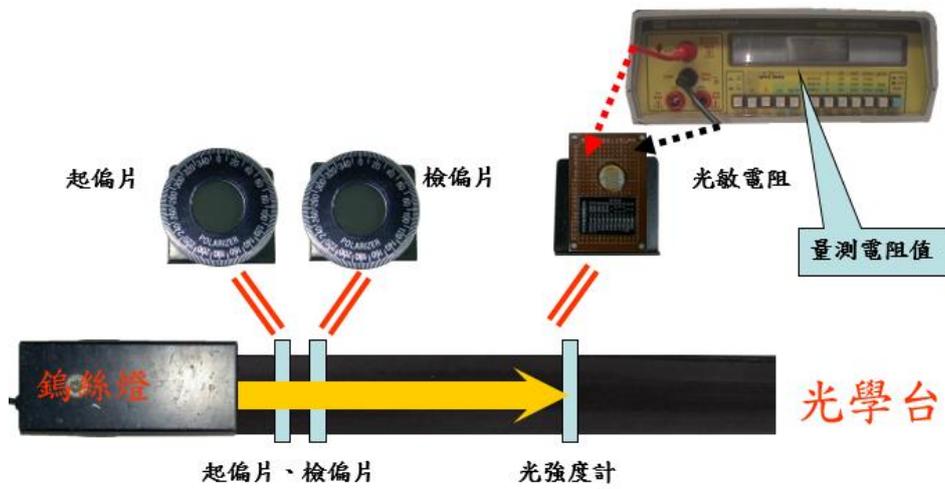


圖 2：傳統實驗裝置

實驗步驟

- (1) 將起偏片、檢偏片、光強度計依序裝於光學台上。
- (2) 先將檢偏板轉至 90 度向上，調整光強度計相對位置，使量測到電阻值小於 $5K\Omega$ 。
- (3) 改變檢偏板之角度，每隔 10 度紀錄光強度計之電阻值。
- (4) 查詢光照度對照表，將光敏電阻值(歐姆)使用內差法轉成照度值(LUX)。
- (5) 分析光照度值與偏振片夾角關係。

光敏電阻的電阻值受光的強弱而影響，隨著入射光強度越強則電阻值下降，因為光敏電阻最大的感測電阻值為 $5K\Omega$ ，所以在傳統實驗裝置中必須注意調整鎢絲燈與起偏片、檢偏片、光敏電阻的距離，避免超出光敏電阻的量測範圍，而且量到的光敏電阻值必須查詢光照度對照表，將光敏電阻值(歐姆)使用內差法再轉成照度值(LUX)才可求得我們要的數據。

利用手機 APP 實驗方法

如圖 3 所示，此次的實驗裝置是利用手機 APP 代替傳統實驗的光敏電阻、三用電錶，光源使用雷射，改變起偏片與檢偏片之間的夾角，由手機直接得到光照度值。



圖 3：實驗裝置

實驗步驟

- (1) 智慧型手機需下載免費的光照度 APP
本實驗中使用兩款免費 APP 分別為“Physics Toolbox Light Meter”及“Light meter”。
- (2) 確認智慧型手機內建的光感測器(light sensor)位置
手機的正面一般會有照相鏡頭及光感測器，光線感測器類似於手機的眼睛，它可以讓手機感測環境光線的照度，因此利用外部光線亮暗變化來確認光感測器位置，如圖 4。



圖 4：確認光感測器位置

- (3) 將雷射、起偏片、智慧型手機依序放在光學平台上。
- (4) 旋轉檢偏片角度找出最大亮度。
- (5) 旋轉檢偏片並漸增角度，與起偏片夾角每格 10 度紀錄一次光照度
起偏片與檢偏片夾角變化為 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90 度。
- (6) 分析光照度值與偏振片夾角關係。

肆、實驗結果之分析及討論

表 1 為 3 組不同實驗裝置的分析數據，分別為傳統裝置(鎢絲燈、光敏電阻、三用電表)、此次手機實驗裝置(雷射、手機 Light meter APP)以及改用另一版手機 APP (Toolbox Light meter)。將 3 組光照度依偏振片的夾角依序記錄如下並配合夾角的餘弦值平方列出。

表 1：實驗數據

夾角	$\cos^2 \theta$	照度 (lux)		
		鎢絲燈+光敏電阻	雷射+Light meter app	雷射+Toolbox Light meter app
0	1	955	3625	4338
10	0.97	865	3027	3509
20	0.88	820	2517	3155
30	0.75	730	2163	2528
40	0.59	545	1780	1937
50	0.41	480	1223	1467
60	0.25	340	748	835
70	0.12	230	382	324
80	0.03	41	81	98
90	0	30	0	0

從表格可發現當偏振片夾角 0 度($\cos^2 \theta=1$)時，三組實驗皆測到最大光照度。當偏振片夾角由 0 度漸增變化到 90 度時，光照度由最亮漸減到近乎全暗，在偏振片夾角 90 度時，照度為 0 lux。

圖 5 為兩偏振片在不同夾角所測得的光照度(I)與夾角 0 度時之照度(I_0)的比值關係圖。當偏振片夾角為 0 度，則角度透光率(I/I_0)=1，隨著偏振片夾角慢慢變大，透光率則漸漸變小。

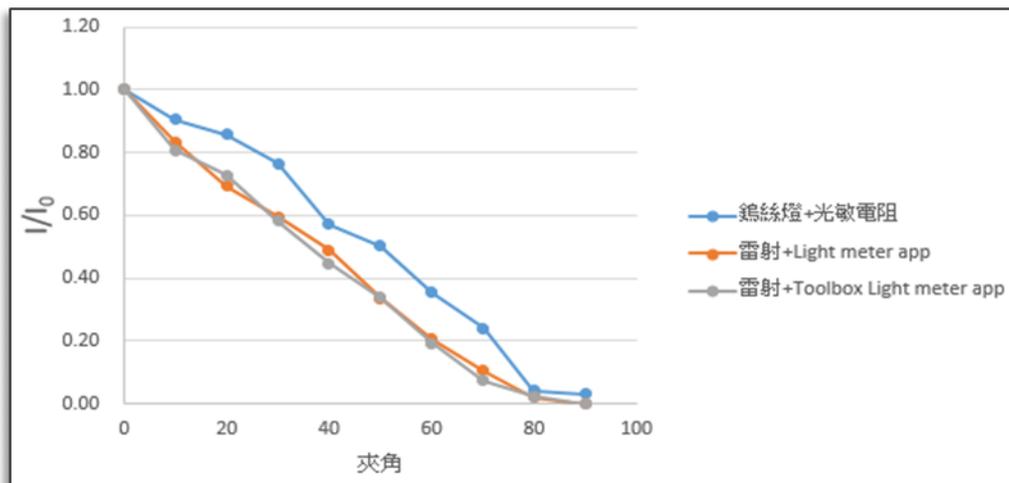


圖 5：光照度 I/I_0 與兩偏振片夾角關係

圖六為偏振片夾角與照光度(lux)的關係圖。從三組不同實驗裝置的結果皆顯示光照度與偏振片角度 $\cos^2 \theta$ 呈線性關係。進行回歸分析，確認實驗三組使用的模式與這些量測數據有多大的符合性，可使用的判別標準即是決定係數(Coefficient of determination) R^2 ，比較三組實驗裝置鎢絲燈+光敏電阻的 $R^2=0.9849$ 、雷射+light meter app 組的 $R^2=0.9853$ 、雷射+Toolbox light meter app= 0.9804 ，三組實驗裝置 R^2 都在 0.9804~0.9853 之間，皆相當接近 1.0（在學術研究上最通俗的觀念是 R^2 愈接近 1.0 愈好）。

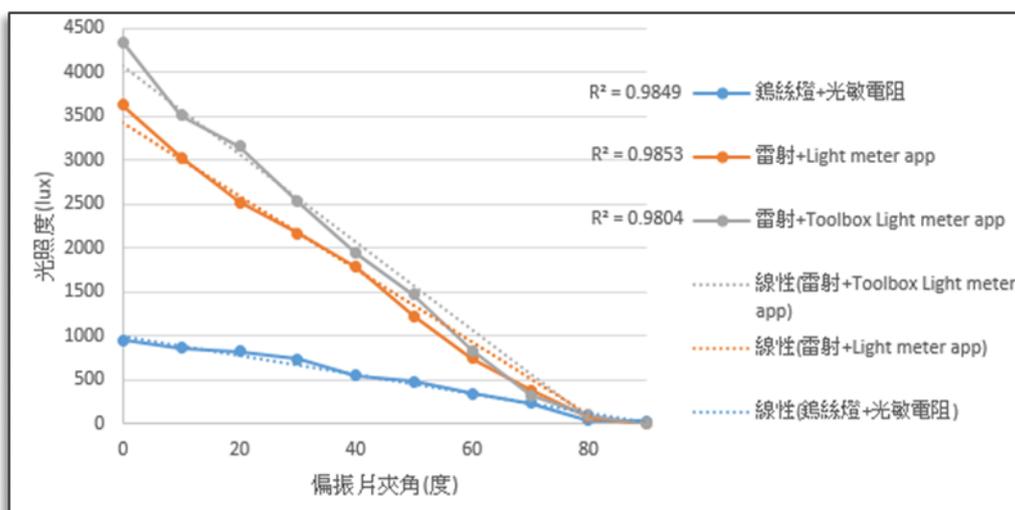


圖 6：光照度(Lux)與偏振片夾角關係

伍、結論

傳統實驗方式使用光敏電阻做亮度的接收和感應，因光敏電阻可接收較大範圍的亮度，因此即使是光線較為發散的鎢絲燈，亦能接收足夠的光線，但此次實驗搭配的感應裝置為智慧型手機的光感測器(light sensor)，受限於手機的光感測器體積較小，因此接收光源的範圍有所限制，在此限制條件下，若使用鎢絲燈當作光源會因為手機的光感測器接收光線過小，導致無法量出光照度，於實驗中也證實，當偏振片夾角在 70 度時，手機偵測到的照度為 0(lux)，因此為求實驗精確度，將手機 APP 實驗光源搭配雷射，可得到完整的結果。

本文提供了一個簡便的觀察光偏振的實驗方法，傳統實驗除了儀器架設受限較多還要計算轉換電阻與照度算是較為麻煩的方法，利用智慧型手機裡內建光亮度的感測器，並下載 APP (LightMeter)作為光照度計，可直接從手機上讀出照度值(LUX)，取代了傳統裝置的光敏電阻、三用電錶功用，且搭配偏振片後即可方便又快速地完成實驗裝置，量測出光照度與偏振角度的關係，準確地驗證馬呂士定律。手機 APP 實驗結果 $R^2=0.9804$ 與傳統方法 $R^2=0.9849$ 相近， R^2 百分誤差取絕對值 $(0.9804-0.9849)/0.9849=0.46\%$ ，兩者的相對誤差不到 1%，證明了本文的實驗方法完全可以取代傳統的實驗方式。實驗的誤差主要受限手機 APP 功能並非能像

照度計般的準確，在尋找最大亮度時，偏振片角度變化 1 度，光照度值是不斷的跳動（變化約十位數 lux），非一固定值，故照度只能取近似值，但利用智慧型手機取代傳統的實驗裝置，就能驗證馬呂士定律是此實驗的優勢。

參考文獻

1. Monteiro,M., Stari,C., Cabeza,C., & Martí,A.C. (2017).The Polarization of Light and Malus' Law Using Smartphones, , *The Physics Teacher* ,55,264.
2. Ogawara,Y., ,Bhari,S., & Mahrley,S. (2017).Observation of the magnetic field using a smartphone, *The Physics Teacher*,55, 184.
3. 曾耀寰(2017).利用智慧手機測量單擺運動,物理教育學刊, 18(1), 65-76。
4. Young,H.D., & Freedman,R.A. *University Physics*, , PERSO.
5. 普通物理實驗(2017)，逢甲大學出版。

謝怡靜、江俊明

Innovation of General Physics Experiment - Verification of Malus' Law by a Mobile Phone

Yi-Jing Hsieh and Chun-Ming Chiang*

Physics Teaching and Research Center, Feng Chia University

Corresponding author: *cmchiang@fcu.edu.tw

Abstract

Free app applications are used to remodel a general physics experiment, the law of Malus. To clarify the properties of the polarized light, traditionally a light sensor and polarizers are required to demonstrate the Malus' law. Here the light sensor is replaced by a smartphone with app applications, Light Meter and Physics Toolbox Light Meter. Owing to the simple and cheap experimental setup, lectures can demonstrate the transverse nature of polarized light more easily. Students can also verify the Malus's law quantitatively based on the measured intensity of light.

Key words: APP, Malus' law, polarizer