

第五屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA5-309

作品名稱：國王的海市蜃樓

姓 名：李 璇

關 鍵 字：海市蜃樓、反射、折射

目 錄

壹、研究題目	1
貳、研究動機	2
參、研究目的	2
肆、研究過程	3
伍、結論	13
陸、討論及應用	15
柒、參考資料	16

國王的海市蜃樓

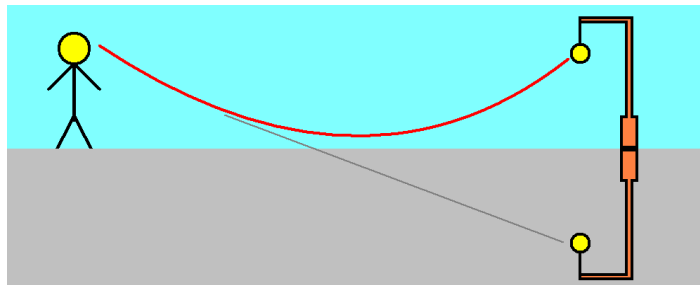
柏油路面上倒影的成因

壹、研究題目

當豔陽高照時，走在柏油路面上，觀察遠方柏油路面上的人、車的景物，經常會因為空氣的折射，而晃動地十分厲害，就好像我們觀察火爐上方的影像一般。甚者，遠方的柏油路面偶爾會出現類似積水的現象，積水中甚至會出現人、車的倒影，但此時的柏油路面不僅沒有積水，更是熱得發燙。我稱此為「柏油路面上的假積水現象」，發生這個現象的區域稱為「假積水區」。



由於我們總是在炎熱的天氣中，看見柏油路面上的假積水現象及倒影，因此多數的人均認為，柏油路面上的假積水現象及倒影僅會出現於溫度高的白天。而主要的成因，是因為空氣層之間的溫差不同，使得遠處射向柏油路面的光，不斷地折射，在接近地面時發生全反射，而產生倒影。許多書本皆認為此現象和沙漠中幻影的成因相同，皆可稱為「海市蜃樓」。



南一版的基礎物理課本寫道：「遠處物體所發出的光線，經過空氣層間的折射和底層的反射後，不是沿直線進入我們的眼睛，而是如圖中所示的曲線，使我們以為是從路面下的倒影所發出。」

在普通物理的課本中，也寫道「當光線接近路面，其前進路徑會通過因為被路面加熱而逐漸變得比較熱的暖空氣。隨著空氣溫度的增加，空氣中的光速也跟著稍稍增加，而相對地空氣的折射率會稍稍降低。所以當光線下降遭遇到逐漸變小的折射率，其路徑將會持續轉向而漸趨於水平面。直到光線為水平且只是稍稍在路面之上，其依舊持續轉向，結果使得光線向上偏。此後光線會因折射率持續變大而持續向上偏。」〈引述：全華出版社物理下 Fundamentals of Physics。作者：David Halliday。〉

但我觀察發現，地面與上層空氣的溫差，並非柏油路面上假積水現象及倒影出現的必要條件；反而和入射光的角度、路面的平坦程度及路面的性質有關。因此我認為假積水現象及倒影主要的成因是「柏油路面的單向反射」而非「空氣的折射與全反射」。我提出了粗糙面在入射光的入射角接近90度時，可發生單向反射的模型。

在旺宏科學獎的初賽報告中，我提出了兩個現象來說明假積水現象及倒影主要的成因是「柏油路面的單向反射」而非「空氣的折射與全反射」。一、在強風中（飛砂石亂走），假積水區及倒影仍存在。二、夜晚地面已和氣溫相同時，強光源亦可出現倒影等等。

評審老師在評語中建議我，「希望能對戶外實驗在適當氣候下再能詳細觀察，對所提出的解釋能更徹底的驗證或否證。」我的想法和評審老師相同，但是自入圍到現在，都沒有遇上寒流，我會在入冬後，在同一地點進行低溫時的觀測。

沒有寒流來幫忙，我選擇了清晨來進行實驗，得到了比白天更佳的觀測資料，更加地確定了我原本所提出的假說，我認為這些證據已使得「因為折射和全反射造成柏油路面假積水現象和倒影」的傳統論述無法再自圓其說。長久以來，「柏油路面的假積水現象」被認為和「海市蜃樓」原理相同，因此，我稱呼這個現象為「國王的海市蜃樓」。

貳、研究動機

在夏日的午後，在炎熱的柏油路面上很容易可觀察到遠方的路面上，出現如鏡子般的倒影，看起來彷彿前方有一灘水，水中有倒影，在某一些位置觀察倒影，倒影會非常清晰，但當我們向前進一些時，倒影卻突然消失了，再往前走一些，我們會驚訝的發現，路面是非常乾燥的，而這個令人驚奇的現象，一般歸類為海市蜃樓中所謂的下蜃。

海市蜃樓是生活中常被提及的一個名詞，柏油路面上的假積水現象隨處可見。一般解釋海市蜃樓中的下蜃的成因，都是由於在上層的低溫空氣，和在下層靠近路面的高溫空氣，因密度的不同，以致於折射率的漸層差異，繼而產生全反射。

我對這個現象很有感興趣，老師上課時匆匆帶過，我覺得很不踏實，回家後查詢關於這方面的資料，並研究課本及一般書籍對海市蜃樓所畫的模擬圖，但我對老師和課本的說詞感到懷疑。一來，近地處的空氣，是否會有如此大溫差，進而產生如此大角度的偏折？再者，光進入不同密度空氣層中，是否會有部分反射？部分反射所佔的比例又有多少？更重要的是，我觀察省道上某些地方可以觀察到非常清晰的倒影，而且是每天經過時，倒影皆清晰，但是又不可能每天每天的空氣層分佈皆相同，這是這些疑問激起我探究柏油路面上假積水區的真正成因。

參、研究目的

- 一、柏油路面上假積水區和倒影的成因。
- 二、當入射光的入射角接近90度時，若反射面為粗糙面，但大尺度看來是平面，反射光是否會由漫射變為單向反射。

肆、研究過程 研究方法

一、觀測地點：

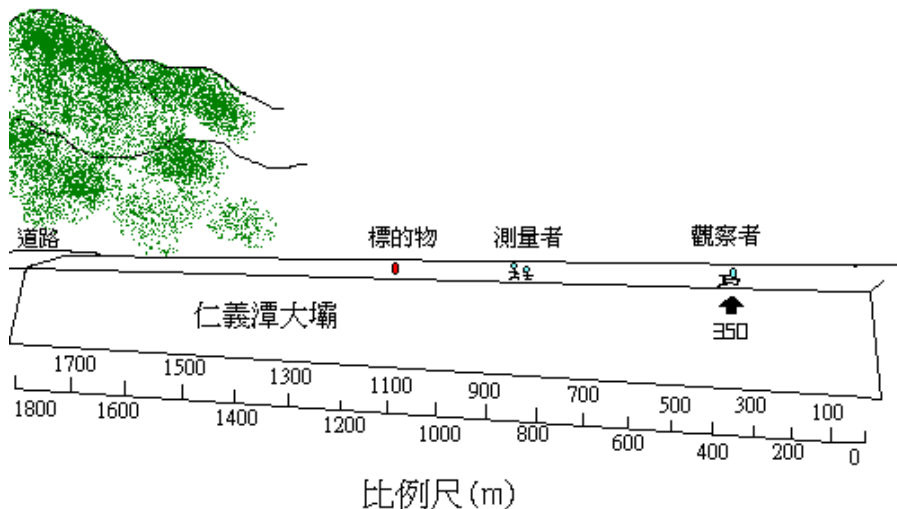
我研究的地點選在嘉義縣番路鄉仁義潭水庫大壩的人行步道上，選擇仁義潭大壩人行步道上的優點是離家近，全程用柏油鋪設，且沒有車輛進出，可以安全地進行實驗。而且地勢空曠，白天夜晚溫差極大，可以選擇不同的時段觀察不同氣溫時的現象。缺點是路面不甚平整。

在找尋實驗地點的過程，我發現台灣的路面大約可分為四個等級，第一級是戰

備跑道、第二級是高速公路及橋樑路面良好的路段、第三級是省道、第四級是一般市區道路，我覺得大壩的路面品質應屬於第四級。傳說機場跑道是最平直的柏油路面，而且還有些地方沒有鋪上柏油，可以作為比較，如果可以到機場做觀測，是最好不過，但機場有層層的管制，嘉義機場外圍也找不到適當的觀測的地點，有一位學校的工友叔叔今年寒假轉到嘉義機場服務，他告訴老師，機場的假積水區有好大好大一片，但是不准拍照，不能到機場做實驗，讓我感到非常非常地遺憾！

大壩上的步道寬約12公尺，一側為仁義潭，一側為一陡坡，因此，常會有很大的陣風，方便研究空氣層溫度分佈對柏油路面上假積水區及倒影的影響。

下圖所標定的觀測位置是初賽前所進行的實驗，在初賽後，我觀察的位置和待測物間的距離漸漸縮短，後來的實驗，觀察位置和待測物間的距離維持在70公尺。



二、研究設備與器材：

A、主要器材：

相機及腳架	三組
天文望遠鏡	一架
自製天文望遠鏡低腳架	一架
高倍率望遠鏡	一架
雙眼望遠鏡	一副
補光燈	兩支
溫度計	三支
尺 (各種尺寸)	N支
照度計	一台
偏振片	兩片
小瓦數雷射筆	一支
30mW雷射筆	兩支
各種尺寸螢光棒	一批
5cmx10cmx0.3cm小鏡子	500片
砂子	一車
黑絨布50mx20cm	一匹

噴霧器

兩架

B、次要器材：

無線電	三支
玻璃紙	數張
腳踏車	兩部
推車	一部
椅子	四張
傘	兩把
帳棚	一頂
墨汁	數升
水紗線	一捆
鋼釘	數根
鐵鎚	一支
手電筒	N支
美工刀膠帶等等文具	N組
施工危險警戒線	數捆

在初賽前，拍攝照片一直是我無法克服的困難，在望遠鏡中清楚的影像，拍起來經放大後，會變得很模糊。在初賽後，我的研究主題引起了幾位自然科老師的興趣，三位喜歡攝影的老師開始幫我拍攝照片，使得觀測紀錄有十足地進步。

三、在旺宏科學獎初賽「前」主要是在日間進行實驗，初賽前所進行的實驗內容：

- (一) 在柏油路面、PU水泥路面、跑道等不同位置觀察假積水現象和倒影。
- (二) 在大壩上不同位置觀察柏油路面上的假積水現象和倒影。
- (三) 用「大頭針法」描繪光在空氣中的路徑。
- (四) 在地面灑大量的冰塊，降低路面溫度，觀察假積水現象和倒影的變化。
- (五) 在地面灑墨汁，改變路面性質，觀察假積水現象和倒影的變化。
- (六) 在地面灑沙子，改變路面性質，觀察假積水現象和倒影的變化。
- (七) 在夜間用強光源觀察強光源的倒影。

四、在旺宏科學獎初賽「後」主要是在夜間進行實驗，研究地點依然是在嘉義縣番路鄉的仁義潭水庫大壩，但觀測地點改變，我設法降低標的物及測量者的高度，盡量縮短標的物及測量者的距離，方便實驗操作及拍攝。

- (一) 大量觀察夜間柏油路面上的假積水現象及倒影。
- (二) 仿造李昌鈺博士重建三一九槍擊案現場的方法，以高功率雷射光束直接看光的路徑。
- (三) 用 500 片長10公分、寬 5 公分、厚 3 公釐的鏡子在柏油地面上鋪上一條長50公尺、寬 5 公分的鏡子條，觀察假積水現象和倒影的變化。
- (四) 在柏油地面上鋪上一條長50公尺、寬20公分的黑色絨布條，觀察假積水現象和倒影的變化。
- (五) 自夜間開始，每格 5 分鐘記錄地面溫度，並拍攝一張倒影的相片，記錄至地面溫度超過攝氏40度以上為止。
- (六) 從半夜到在白天，觀察雷射光束的偏折。
- (七) 在夜間觀察PU跑道上的假積水現象和倒影。
- (八) 觀察柏油的表面性質隨溫度的變化。

五、旺宏科學獎初賽前的實驗結果

- (一) 在柏油路面、PU水泥路面、跑道等不同位置觀察假積水現象和倒影。

在實驗的初期，我四處觀察柏油路的假積水現象，希望可以找到一個適合觀測的地點，在這段時間裡，我得到了一些結果。

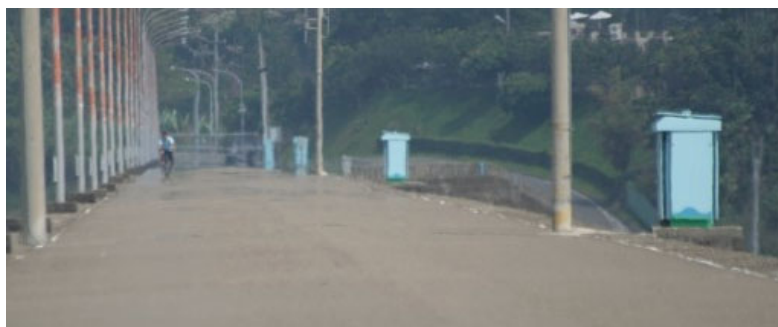
- ①在舊馬路鋪上新的柏油路面時，假積水區會大增。
- ②在平坦水泥地面上，無法觀測到假積水區。
- ③在體育場筆直平坦的跑道上，無法觀測到假積水區。

(二) 在不同位置觀察柏油路面上的假積水現象和倒影。

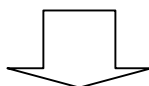
觀察者的高度會影響假積水區的出現與否。當我蹲下時，所看到的假積水區範圍會大幅度的向觀察者方向前移且較明顯。

而當我向前進的時候，眼睛所可以看到的假積水區將逐漸後退。因此，當觀察者前進時，所觀察到的假積水區及積水區中的倒影會消失，但當觀察者在此位置蹲低一些時，積水區及積水區中的倒影又會再次出現。

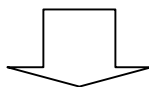
下圖中，拍攝時間是下午 2：35，當時氣溫34.6度，路面溫度40.2度。



站著觀察



半蹲觀察



貼地觀察

(三) 用「大頭針法」描繪光在空氣中的路徑。

在高中光學實驗中，利用「大頭針法」來尋找光的路徑。我們在透鏡或玻璃磚前後排列數根大頭針，使得我們在某一處看這些針時，所有的針都會重合

，由此可知光前進的軌跡會經過每一根大頭針，進而描繪光前進的路徑。

按此要領，我希望可以在柏油路面出現假積水現象及倒影時，描繪出光的路徑圖，但事與願違，柏油路面上的倒影並非清晰的一點，而且物體及倒影都在不斷地搖晃，根本無法得到有效的實驗數據。

若可以知道光的路徑將可以解決所有的問題，大頭針法在理論上亦是可行的辦法，但是在實際上卻是行不通的，我們要先量得路面的起伏，再量出每根距離「大頭針」的距地高，最後再標定出光的軌跡。

經過多個烈日的烤曬後，我們知道大尺度測量的困難，這不是我們一般高中生可以完成的，需要經過訓練的測量人員才有可能辦到。

(四) 地面灑大量的冰塊，降低路面溫度，觀察假積水現象和倒影的變化。

我希望可以在物體和觀察者之間灑大量的冰塊，降低路面溫度，觀察假積水現象和倒影的變化，以釐清假積水現象和近地表高溫空氣層之間的關係。

這是一個正確的想法，因為假若可以在短時間內降低近地表空氣層的溫度，而假積水現象依然存在，就說明了空氣的折射不是造成假積水現象的主因。但是，這個實驗是失敗的，因為場地實在太大，我沒有能力讓整個步道近地層的空氣溫度突然下降，除非要請消防車加滿酒精，往大壩步道上灑，才有可能使近地空氣層溫度下降，但這是不可能做到的。我在我和假積水區間灑了數桶碎冰，和預期相同，倒影沒有什麼改變，但這不能說明什麼，因為我們雖然灑了數桶碎冰，但是觀測區實在是太大，溫度根本沒下降多少。

(五) 在地面灑墨汁，改變路面性質，觀察假積水現象和倒影的變化。

(六) 在地面灑沙子，改變路面性質，觀察假積水現象和倒影的變化。

我希望可以改變柏油路面的表面性質，觀察假積水現象和倒影的變化，以釐清造成假積水現象的光線究竟是打到柏油路面才反射，還是在空氣中發生反射或折射。

我自己覺得這個想法很好，因為一旦灑墨或灑沙子後，如果積水區或積水區中的影像就因此有很大的改變，表示光線是打中柏油路面反射才造成假積水現象的。但是，這個實驗依然是失敗的，原因和觀測（四）相同，場地實在太大！！

(七) 在夜間用強光源觀察強光源的倒影。

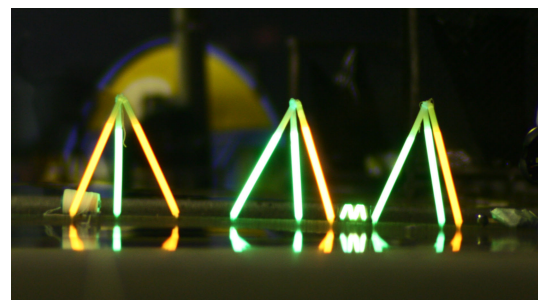
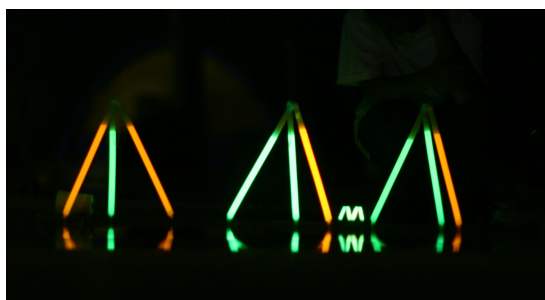
在初賽繳件截止前，我在夜間觀察柏油路面的假積水現象。因為在夜間地面和空氣的溫差會變小，因此在夜間觀察強光源亦有倒影後，我越來越覺得倒影不是經空氣折射而產生，而是經柏油路面反射產生的。



六、旺宏科學獎初賽通過後的研究結果

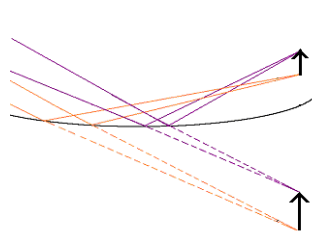
(一) 大量觀察夜間柏油路面上的假積水現象及倒影。

我不認為柏油路面的假積水現象主要是因為空氣折射造成的，因此我開始選擇在天亮前來尋找假積水現象。由於周圍一片漆黑，我不容易找到假積水現象，拍攝也非常困難，在多次的尋找後，我在老師的協助下，成功地拍下清晨前清晰的倒影。證明假積水現象在地面溫度和氣溫接近時，仍是可能發生的。

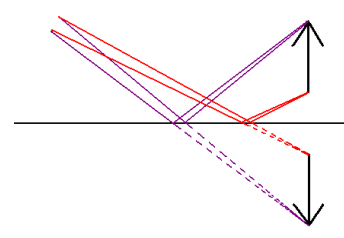


拍攝時間凌晨 3 時 3 分，地面溫度 29.25 度，氣溫 28.50 度，左圖是眼睛在望遠鏡中所見的影像，右圖是相機過度曝光後所得的影像，右圖中可明顯看到假積水區。拍攝位置和物體距離 75 公尺，相機鏡頭中心位置距地高 22.0 cm。

此外，因為地形起伏，照相機與螢光棒之間的地形不可能是一個平面。我在某些照片中可以清楚看見倒、反、倒的影像，這些倒影以及正影經過一整個晚上後，形狀並沒有改變，若柏油路面假積水區內的倒影是因為空氣折射所造成的結果，則倒立和正立的影像應該會隨著空氣不斷的流動而隨之改變，不可能維持穩定的形狀，可見假積水區內的影像為倒立或正立，是由地形決定而非空氣折射造成的。下面兩張圖示說明凹面的地形可以形成正立的影像，凸面或平面的地形會呈倒立的影像。



凹面的成像

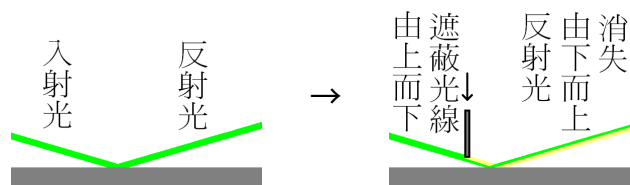


平面的成像

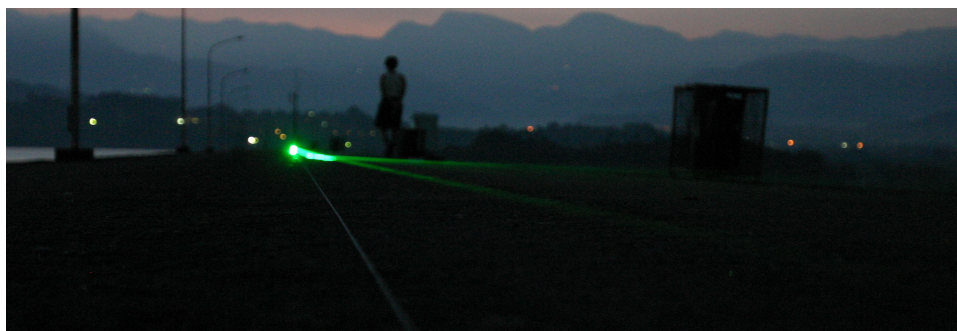
(二) 以高功率雷射光束直接看光的路徑。

我希望能在夜晚使用高功率雷射取代大頭針法，直接看出光的路徑。我希望可以看到雷射光束以接近 90 度的入射角射向柏油路面時，雷射光束不會漫射，而是反射出一道沒有發散的雷射光束。

在實驗時，我將 30mW 的雷射筆架在天文望遠鏡尋星鏡的位置上，微調至反射光不再漫射，而是一道筆直的光束。但是，由於入射角和反射角都接近 90 度，我很怕我看見的反射光束是沒有打中柏油路面的雷射光束，而非反射後的光束。因此，我做了一個小小的檢測，我以障礙物由上而下將入射光漸漸遮去之後，發現反射光束是由下而上漸漸消失，證明確實是反射光束而不是未打中柏油路面的入射光。（見下頁圖示）



由於我在網路上購買的30mW雷射筆，直進性並不好，在前進 100 公尺後，光束直徑就會增大至 6 公分左右，在某一次實驗結束前，我意外拍攝到一張令我感動萬分的照片。當時，在天色將亮之際，雷射光束已漸漸不可見，一道雷射光束打中一個略微突起的柏油路面時，因為光束太粗，使得上半部沒有打中柏油路面，下半部打中柏油路面且產生單向反射，因而得到了兩道分叉的光束！**這張照片證明了粗糙的柏油路面可以產生單向反射！**（見下頁的圖）此時的反射區，斷斷續續前後長達約二三十公尺。



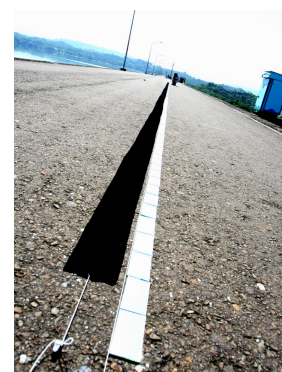
拍攝時間，凌晨 4 時44分。柏油路面上反射區距離雷射筆 125 155 公尺。



拍攝時間，凌晨 4 時48分，自反射區由上往下拍。主要反射區斷斷續續前後長達30公尺。

- (三) 用500 片長10公分、寬 5 公分、厚 3 公釐的鏡子在柏油地面上鋪上一條長50 公尺、寬5 公分的鏡子條，觀察假積水現象和倒影的變化。

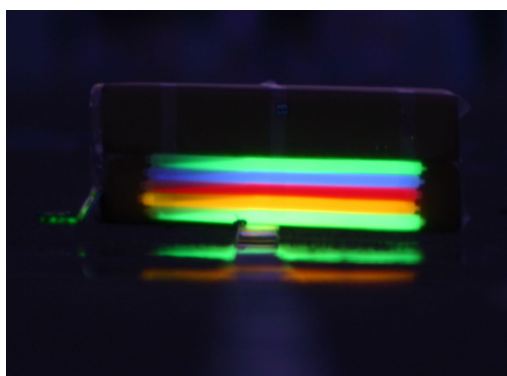
我們一直希望能夠改變地面的性質，並使得假積水區及倒影產生變化，如此一來就可以知道，物體發出的光線是經由地面反射，而非由折射和全反射使得光線彎曲向上。我希望將地面變成一小片一小片的平面，如此一來，入射角接近90度的光線入射時，就會產生近乎漫射的效果，我預期假積水區應該會消失。我用 500 片小鏡子在地面上鋪上一排長達50公尺長、5 公分寬鏡片帶，如右圖所示。



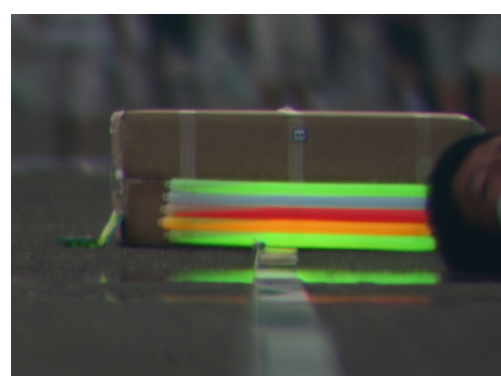
鋪設鏡片非常非常辛苦，我在白天進行兩次小規模的實驗（200 片，沒有鋪得非常整齊）都失敗後，開始質疑我的理論是否正確，為了避免遺憾，我在夜間利用雷射光校準，在地上釘了一條長直水紗線，並在天亮前就擺好鏡片，從半夜一直觀查到天明，第三次實驗的結果非常成功，在擺上鏡面的 5 公分寬度內，假積水區和倒影被嚴重改變了。



擺置寬僅 5 公分、厚僅 0.3 公分的鏡子，應不會破壞地表的空氣層，對空氣層造成的變化，在鏡子邊緣也應該是漸進的改變而不是銳利的改變，但是照片中卻出現了明顯的不連續現象，鋪設鏡子的地方，積水區和倒影被嚴重改變了。這個現象並無法用光在空氣中的折射、全反射來解釋。



↑ 鏡子



↑ 鏡子

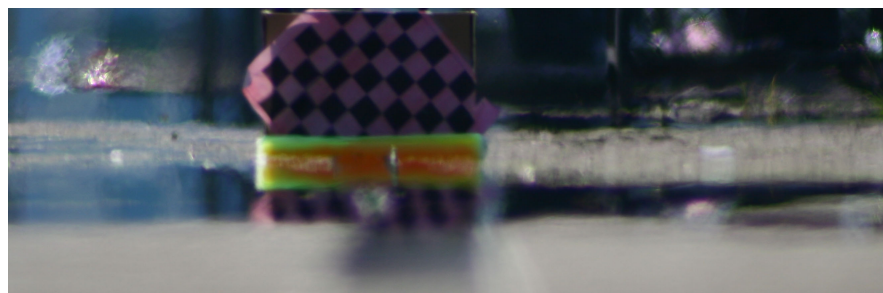
左圖：拍攝時間，凌晨 4 時00分。

右圖：拍攝時間，清晨 5 時33分。

在兩圖中均可清楚的見到鋪設鏡子的區域，積水區及倒影消失了。

(四) 鋪上一條長50公尺、寬20公分的黑色絨布條，觀察假積水現象和倒影的變化。

和鋪鏡子一樣，我計畫在地面上鋪設一條長50公尺、寬20公分的黑布。因為黑布的反射率比柏油路面小，因此我預期，鋪設黑布的地方，其倒影會變暗。實驗結果，倒影有一些改變，但並不是變暗。我沒有得到有價值的結論，因為當入射光的入射角接近90度時，絨布面和柏油路面的反射率可能是近似的，甚至是更好的。



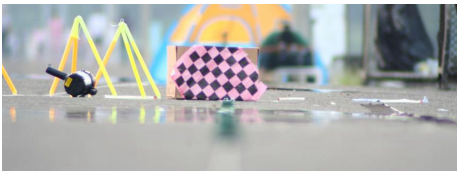
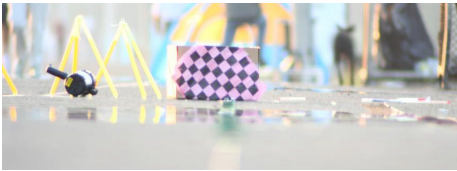
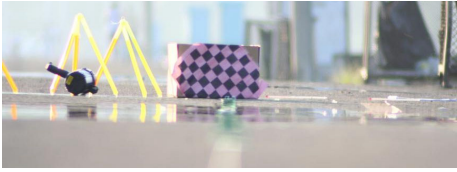
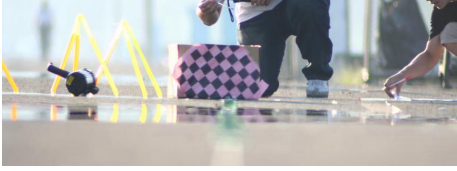
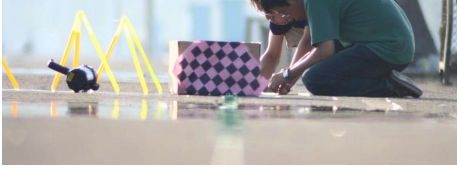
↑ 黑布

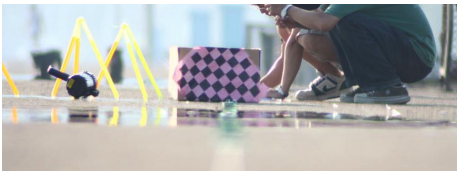
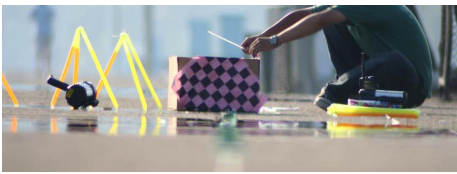
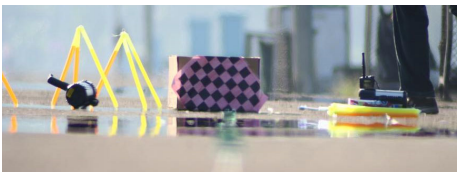
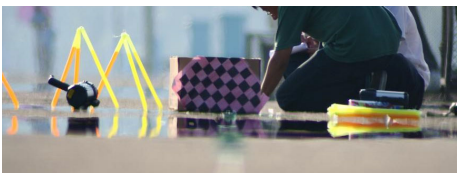
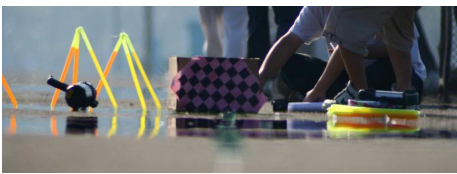
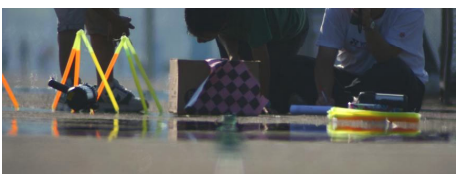
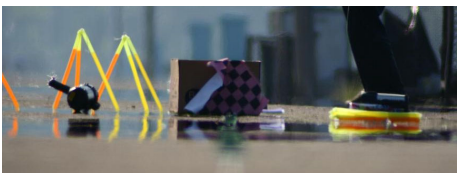
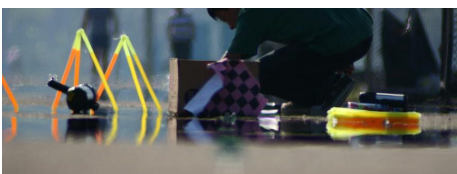
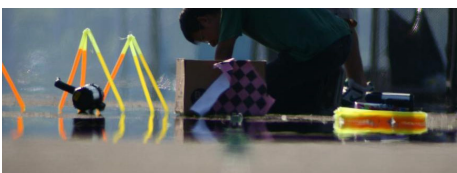
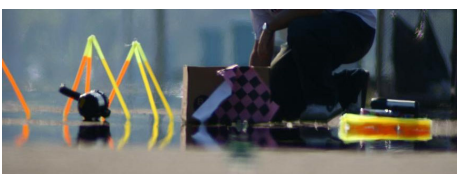
拍攝時間，上午 8 時23 分。觀察者和目標距離 75 公尺。

(五) 自夜間開始，每隔 5 分鐘記錄地面溫度，並拍攝一張倒影的相片，記錄至地面溫度超過攝氏40度以上為止。

我認為，隨著地面溫度升高，光在空氣中折射得越嚴重，使得入射光線和地面間的入射角變小，因此假積水現象以及倒影出現的範圍就增加了。

拍攝地點和物體距離75公尺。我以兩個不同的角度，大約拍攝了三個小時，記錄如下。從照片中明顯發現假積水區隨著溫度升高而增大，從一點點積水變成汪洋一片，這和我的理論是吻合的。

觀測地點A 距離物體75公尺 (相機+望遠鏡)	時間 地面 溫度	觀測地點B 距離物體75公尺 (相機+長鏡頭+電腦放大)
	05 : 30 27.07 °C	
	05 : 40 27.30 °C	
	05 : 50 28.17 °C	
	06 : 00 28.43 °C	
	06 : 10 29.07 °C	
	06 : 20 30.87 °C	
	06 : 30 30.30 °C	

	06 : 40 30.40 °C	
	06 : 50 31.73 °C	
	07 : 00 33.27 °C	
	07 : 10 34.97 °C	
	07 : 20 34.33 °C	
	07 : 30 36.53 °C	
	07 : 40 38.63 °C	
	07 : 50 39.23 °C	
	08 : 00 40.00 °C	
	08 : 10 40.10 °C	

(六) 從半夜到在白天，觀察雷射光束的偏折。

我在近地表處打一道貼地的雷射光束，用固定架固定雷射筆，觀察雷射光在所打出的 100 公尺外所打出的光點，如果我第（五）點的理論是正確的，我應該可以看到雷射光所打出的光點，會隨著溫度變化而略微改變位置，但是，測量的結果讓我非常驚訝，自清晨五點一直到早上八點，積水區的範圍也增大非常多，但是雷射光束在 100 公尺外所打出的光點在這三個小時中居然是一動也不動！（在路邊的變電箱上黏塑膠尺，因此誤差應在 1mm 內）這個觀察同時否定了書本原有的海市蜃樓理論，同時也否定了我自己在（五）中所提出的假設。

(七) 在夜間觀察PU跑道上的假積水現象和倒影。

為了持續探求為什麼白天的假積水區比夜晚大，我希望找到非柏油路面的假積水現象，有了夜間的經驗後，我知道夜間比白天更可以清楚的觀察假積水現象，因此我在黃昏時又回到體育場的PU跑道，貼地用望遠鏡觀察是否有假積水現象，觀察的結果和前幾個月的觀察相同，PU跑道無法產生假積水現象。

但當天我帶著小表弟一起出門，他很好奇，也學我貼在地面上看遠方的螢光棒，沒想到因為他的頭比較小，因此觀測位置比我更低，他見到了螢光棒的倒影，我後來也將頭側一邊貼地觀察而看到了PU跑道上的假積水現象，此時鏡頭的中心位置距離地面約 3.4 公分，觀測位置和螢光棒距離為 110 公尺，目測倒影約有 3 公分，當鏡頭向上提高 1 公分後，倒影就完全不可見了。

(八) 研究柏油的表面性質。

我認為若是因為空氣層而造成假積水現象，那白天地面和空氣溫差大的PU跑道，應該比晚上的柏油路面要容易產生假積水現象，但實際情況卻不然。再加上隨著天漸漸變亮後，假積水區會增加，讓我不禁懷疑，柏油和其他材質比較，是不是有什麼特別的性質，這個實驗目前我還在進行中，希望在決賽前可以有所結果，附上兩張柏油表面漂亮的照片。



伍、結論

一、一般人認為，因為光在空氣中折射及全反射造成柏油路面的假積水現象，這樣的說法不能解釋的現象有：

- (一) 強風下，飛砂走石，地表空氣層迅速流動，但假積水區及倒影依然存在。
- (二) 夜裡，氣溫和地面溫度幾近相同時，仍然有假積水區及倒影存在。

- (三) 整個夜裡，氣溫漸漸改變，有時有風，有時無風，假積水區內的倒影依然存在，而且位置、大小、正立倒立都沒有改變。
- (四) 在貼近地面觀察時，可以在七十餘米就觀察到假積水現象及倒影，若為空氣折射，無法在短距離內造成大角度的偏向。
- (五) 平坦的PU跑道在跑道溫度高時，反而比清晨凹凸不平的柏油路面難觀察到假積水現象。
- (六) 不論白天或夜晚，用小鏡子鋪成一條細長條的鏡子後，假積水現象及倒影有明顯、銳利的改變。而此時，空氣層的溫度分佈，是不應有太大的改變的。
- (七) 在短距離內，貼地的雷射光束的路徑根本沒有因為地面溫度升高，而有明顯的改變。

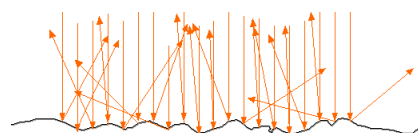
二、物體發出的光可能可以經由柏油路面反射成像的證據：

- (一) 雷射筆發出的雷射光以入射角接近90度時射向地面，可以產生單向反射。

三、建立粗糙面單向反射的模型

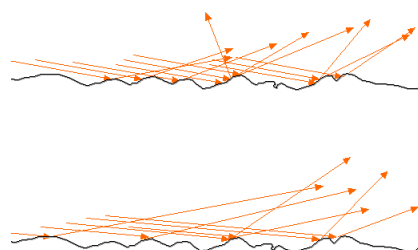
(一) 模型的建立

觀察右方三個圖形，一束平行光射向一粗糙面，當入射角越大時，入射光可以打到粗糙面上每一個凸起的部分越小，當入射角接近90度時，幾乎都是打到每一個凸起的正上方，因此可以形成單向反射。



(二) 模型的驗證

將地面鋪滿鏡子，每一片鏡子均可成像，但是當入射光以接近90度射向這些破碎的鏡面時，由於每一面鏡子的角度都不相同，每一片鏡子的最高點都是尖角而非圓弧狀，因此反而會發生漫射！使得假積水現象及倒影消失。



四、白天假積水區會增大的原因：

我原本以為地面溫度增加，假積水區會變大的原因，是因為射向地面的光線經過折射之後，入射角會越來越大，使得柏油路面可以產生單向反射的區域會變大，這使得人眼所見的假積水區增加。但是後來我發現雷射光束的路徑根本不會因為地面溫度升高而偏折，因此這個理論是不成立的。

白天假積水區會增大的原因，是「因為地面溫度增加，而造成某種改變，而使得假積水區變大」；還是「因為強光出現，而造成某種改變，使得假積水區變大」。到底是溫度使假積水區變大，還是強光源使假積水區變大，我還沒有辦法確定，我仍努力地在找尋白天積水區變大的原因。我目前希望研究柏油表面性質和溫度的關係，以及強光源出現時假積水區的變化，實驗正在進行中，希望在作品發表前可以有一些結果。

五、總結：

我翻閱了許多寫到柏油路面上有假積水現象及倒影的書籍，包含了南一、翰林

版的課本，以及很有名（老師說的）的Halliday普通物理學課本等等，都認為柏油路面上假積水現象和倒影的成因，和沙漠中的幻象相同，也都將柏油路面上的這個現象稱為「海市蜃樓」。

在實驗之初，原本我只是想量測這個現象的一些性質，我也認為這個現象和海市蜃樓相同，都是空氣中折射及全反射就造成的，我量測每層空氣的溫度，查閱不同溫度空氣的折射率，計算全反射角等等。但越來越多不可解釋的原因，逼使我相信我所見，而對課本提出質疑。也使得一群與班上的同學和自然科的老師開始注意這個現象。

在整個研究過程中，提出粗糙面的單向反射模型是一件大膽的假設，當這個模型剛提出時，我是非常惶恐的，這個模型看似合理，但根本無從驗證，因為事實上，這個實驗的量測極度困難，距離太遠，拍出來的影像很小，再加上白天溫度高，影像晃動地十分劇烈，所得的結果一直不夠有說服力。

為了使畫面穩定，選擇在夜間進行實驗，是一個重大的轉捩點，在凌晨3點後，地面溫度會降低到和氣溫相近，空氣中的擾動也幾乎不可見。指導老師建議我買支高功率的雷射筆試試，讓我開始有突破性的進展，我直接用雷射光看見粗糙面單向反射的現象，這使得我信心大增，堅信我建立的模型是正確的，鏡子的實驗，更是使得「因為溫差使得光在空氣中產生折射、全反射，造成柏油路面積水的現象」，這樣的論點越來越站不住腳。

這個實驗在量測及拍攝上的困難遠遠超過我的想像，所幸在學校眾多自然科老師的建議及幫忙下，我得以用學校既有的器材完成整個實驗。將地科教室的天文望遠鏡貼地架設，用相機抵住望遠鏡的目鏡，清楚地拍下我們需要的畫面，是在實驗的技術中，另一個突破的關鍵。

夜晚可以進行實驗的時間其實不長，只有兩個小時左右，兩點前，地面氣流仍然可見，夏天，四點半以前就漸漸亮了，每次辛苦的將器材搬到大壩上，都只能完成一點點工作。最後在指導老師的請託下，自然科的老師們、實習老師們給予我重大的幫忙，協助我在半夜架設器材、在地上艱苦地排出長50公尺的斷裂鏡面（工程浩大），最終得到令人振奮的結果。



經過我幾個月來的觀察及實驗，我大膽地說：「柏油路面上的積水與倒影，是由於光線以接近90度的入射角射向柏油路面，進而發生單向反射，產生清晰倒立的像。這個現象的發生，必須仰賴柏油路面的反射，因此，和沙漠中大距離的海市蜃樓現象是不相同的，我將這個長期以來被眾人誤會，十分類似海市蜃樓的現象，稱為國王的海市蜃樓。」

陸、討論及應用

我從今年二月寒假時開始斷斷續續觀察這個現象，在暑假時，進行了五次大規模的

夜間觀察，由於場地很大，攝影器材很多，每每需要多位老師幫忙，使得這個實驗的進度總是落後想法很多，因此，拖了這麼久，還沒有完成我想要做的工作。除了我先前所提到要觀察柏油的表面性質外，有一些實驗是我很想進行的。

- 一、如果可以的話，我希望可以去機場做實驗，因為機場的地面超平坦，而且柏油路面跑道和水泥路面跑道並列，如此一來，可以比較柏油路面和水泥路面的差異，確定積水區變大是由空氣造成還是路面造成。
- 二、如果可以的話，我希望在半夜時打一發照明彈，，照亮整個大壩，看看強光下，積水區會不會變大。
- 三、如果有儀器可以在大太陽底下，測量一小區域內氣體的溫度（小於 1mm），那將可以知道究竟光線會不會在空氣層之間產生反射。
- 四、如果可以挖一條長50公尺、寬 5 公分、深20公分的筆直壕溝，則可以使得「鏡子實驗」更上一層樓。如此一來可以去除鏡面凸出地面，對地表 3mm 空氣層的破壞，又可以去除因為反射其他光源所造成的影響，會得到更好的影像來判斷究竟光線是打中地面再反射，還是在空氣中就反射了。
- 五、如果有阿拉丁神燈，我要精靈幫我把路面的空氣抽掉，如此一來就可以知道，白天的積水區會變大，到底和空氣有沒有關係了。

柒、參考資料

Computing differential refraction

<http://www.ls.eso.org/lasilla/sciops/2p2/E2p2M/FEROS/Projects/ADC/references/refraction/index.html>

海市蜃樓的成因

<http://www.phy.cuhk.edu.hk/phyworld/iq/mirage/mirage.html>

台灣師大物理系 物理問題討論區

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewforum.php?forum=2&start=60&setuptopic=>

物理（下）Halliday著 全華科技圖書

大學物理四 東華出版社

高三 物理上 南一版 龍騰版 翰林版