

# 臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：物理學

作 品 名 稱：國王的海市蜃樓

得 獎 獎 項：第二名

新加坡正選代表：新加坡第 30 屆青年科學節

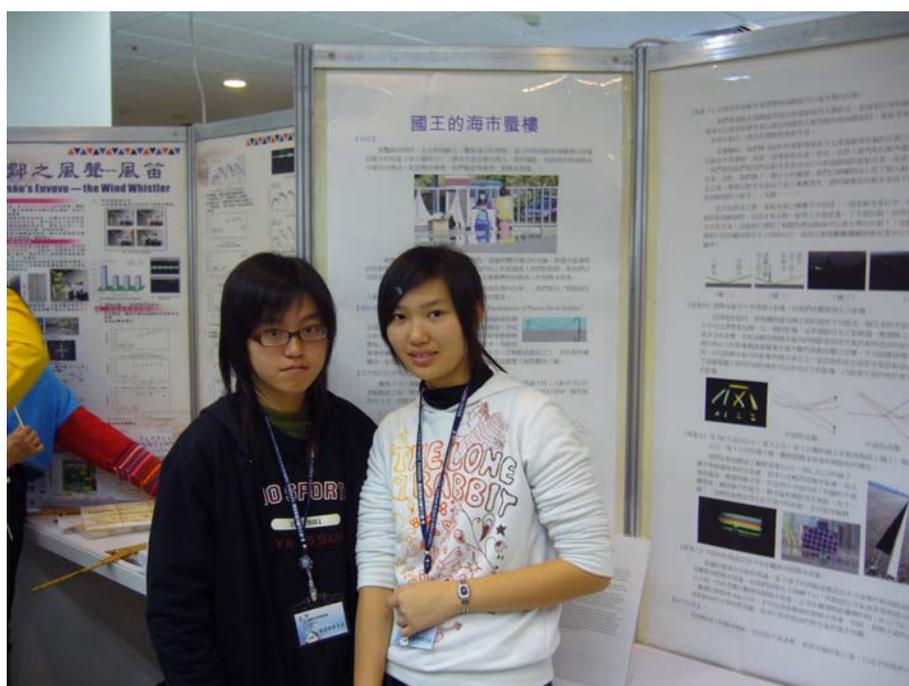
學 校 / 作 者：國立嘉義女子高級中學

戴君容

國立嘉義女子高級中學

陳冠樺

## 作者簡介



作者一：陳冠樺

簡 介：

我是陳冠樺，就讀嘉義女子高級中學，在家人的鼓勵下，自小就與科學接觸，因此對科學產生濃厚的興趣。高中時，和兩位同學在莊立山老師和莊立帆老師的指導下，進行此次的科展。在科學研究的過程中，雖然辛苦，但也讓我受益良多、有所成長，希望未來能繼續從事科學方面的研究。

作者二：戴君容

簡 介：

我是戴君容，成長在小而美的嘉義市，從小就對周遭的事物充滿了旺盛的好奇心，更喜歡閒暇時從事休閒活動。高中時，因緣際會和兩位好伙伴在莊立山老師和莊立帆老師的指導下，開始著手進行科學展覽，在過程中，我們有歡笑有爭吵，也學到了很多，我想這是個難得的經驗，更是個難忘的回憶。

## 摘要

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，但當我們向前進一些時，倒影卻突然消失了，這個現象，一般稱為海市蜃樓。

一般解釋海市蜃樓的成因，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。

但我們觀察發現，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。我們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。並由實驗來驗證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」。

# The Emperor's Mirage

## Abstract

Under the scorching sunshine, we can see the reflection on the tarmac in the distance just like a water puddle on the road. And the water also reflects the people and object nearby. But, in fact, the tarmac road over there is very hot and dry. Therefore we call the phenomenon as the "false water puddle on the tarmac."

According to the textbook, the main reason for "false water puddle on the tarmac" is that the temperature difference leads to the refraction of the light and causes the phenomenon.

However, from our observation, the theory still can't explain some phenomenon, For example, the "false water puddle on the tarmac" remains to appear when the wind blows fiercely. Even with little temperature different at night the phenomenon is still obvious. Therefore, in our opinion, the temperature different of the air is not a necessary condition of "the false water puddle on the tarmac."

We bring up the model to explain the phenomenon that when the incident angle of the light approach 90 degrees, the light will result in one-way reflection. According to the model, furthermore, we make experiments at midnight and at dawn. The result of the experiment assures us the hypothesis of the model, Consequently, we hold the ideal that the main condition of the "false water puddle on the tarmac." Is not because of the refraction and the total reflection but because the light reflects off the road and result in the one-way reflection on the tarmac road.

# 目 錄

一、研究題目	1
二、研究動機	2
三、研究目的	2
四、研究過程	2
伍、結論	15
六、討論及應用	17
七、參考資料	17

# 國王的海市蜃樓

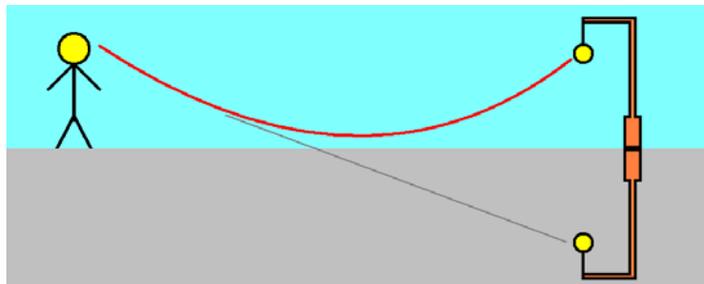
～柏油路面上倒影的成因～

## 一、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。我們稱此為「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。〉

但我們觀察發現，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。因此我們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」。我們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。

我們在四月初，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。我們一直在等待冬天的到來，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認。但是今年的寒流都還沒到。我們在十月間找了兩天陰雨後的晚上觀察，依然看到假積水區。

沒有寒流來幫忙，我們選擇了清晨來進行實驗，得到了比白天更佳的觀測資料，更加地確定了我們原本所提出的假說，我們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，我們稱呼這個現象為「國王的海市蜃樓」。

## 二、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。

我們對這個現象很有感興趣，老師上課時匆匆帶過，我們覺得很不踏實，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，但我們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，我們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們探究柏油路面上假積水區的真正成因。

## 三、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。

## 四、研究過程～研究方法

(一) 觀測地點：

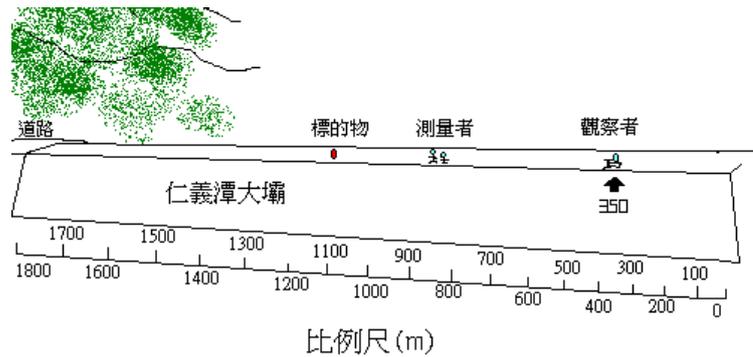
我們研究的地點選在嘉義縣番路鄉仁義潭水庫大壩的人行步道上，選擇仁義潭大壩人行步道上的優點是離家近，全程用柏油鋪設，且沒有車輛進出，可以安全地進行實驗。而且地勢空曠，白天夜晚溫差極大，可以選擇不同的時段觀察不同氣溫時的現象。缺點是路面不甚平整。

在找尋實驗地點的過程，我們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，我們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，讓我們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在實驗初期所進行的實驗，在實驗後半段，我們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：

1、主要器材：

相機及腳架	四組
天文望遠鏡	一架
自製天文望遠鏡低腳架	一架
Leica 望遠鏡及轉接環	一組
雙眼望遠鏡	N副
補光燈	兩支
溫度計	N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
黑絨布50mx20cm	一匹
壁報紙(黑、白)	N十張
發電機	三部
工業用電風扇(180w)	15架
聚光燈(1500W)	六盞
聚光燈燈架	一架

2、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	數張
鋁箔墊	數張
傘	兩把
帳棚	一頂
墨汁	數升
砂子	一車
水紗線	一捆
鋼釘	數包
大鐵鎚	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
熱熔槍	一把
各式木架	數個
電熱器	一個

在實驗初期，拍攝照片一直是我們無法克服的困難，在望遠鏡中清楚的影像，

拍起來經放大後，會變得很模糊。在實驗中後半段，我們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們拍攝照片，使得觀測紀錄有十足地進步。

(三)在實驗初期(2006年二月~五月)，主要是在日間進行實驗，實驗初期所進行的實驗內容：

1. 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。
2. 在大壩上不同位置觀察柏油路面上的假積水現象和倒影。
3. 用「大頭針法」描繪光在空氣中的路徑。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 在夜間用強光源觀察強光源的倒影。

(四)在實驗中期(2006年六月~十月)，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，我們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。實驗內容如下：

1. 大量觀察夜間柏油路面上的假積水現象及倒影。
2. 仿造李昌鈺博士重建319槍擊案現場的方法，以雷射光束直接看光的路徑。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 在夜間觀察PU跑道上的假積水現象和倒影。
7. 用人造強風來驗證沒有空氣折射也可以產生假積水區和倒影。
8. 在柏油路面上鋪上黑紙和白紙觀察假積水區和倒影。

(五)在實驗近期(2006年十一月~2007年二月)，主要是在寒流來襲的夜間進行實驗，研究地點和觀測地點和實驗中期相同，我們盡量拉長實驗時間，觀察各種情況下假積水區的變化，最長一次的實驗，超過了三十個小時。實驗內容如下：

1. 在寒流來襲時的夜間進行實驗，地面與空氣層無溫差時，觀察積水區內的倒影。
2. 將雷射筆以熱熔膠、大鋼釘固定於地面上，觀察雷射筆所發出的光徑在24小時內的變化。
3. 在狂風中觀察積水區內的倒影。

4. 寒流來襲時連續30小時定點觀測假積水區及假積水區內倒影變化。

(六)在實驗初期的實驗結果

1. 在柏油路面、水泥路面、PU跑道等不同位置觀察假積水現象和倒影。

在實驗的初期，我們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，我們得到了一些結果。

- 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PU跑道上，無法觀測到假積水區。  
(在實驗中期，在PU跑道亦觀測到假積水區內的倒影。)

2. 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。當我們蹲下時，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。

而當我們向前進的時候，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

3. 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

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，我們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。

#### 4. 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。

我們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，我們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。我們在我們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。

#### 5. 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。

#### 6. 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。

我們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。

我們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！！

#### 7. 在夜間用強光源觀察強光源的倒影。

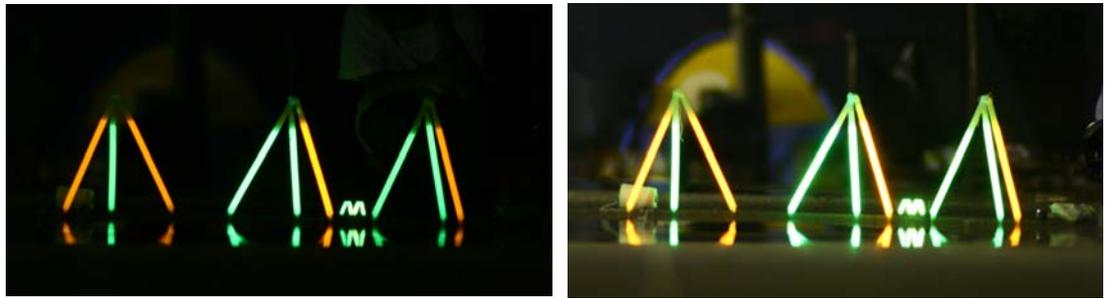
在實驗初期最後，我們在夜間觀察柏油路面的假積水現象。因為在夜間地面和空氣的溫差會變小，因此在夜間觀察強光源亦有倒影後，我們越來越覺得倒影不是經空氣折射而產生，而是經柏油路面反射產生的。



### (七)實驗中期的研究結果

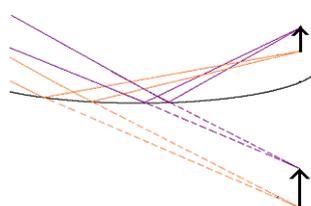
#### 1. 大量觀察夜間柏油路面上的假積水現象及倒影。

我們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，因此我們開始選擇在天亮前來尋找假積水現象。由於周圍一片漆黑，我們不容易找到假積水現象，在多次的尋找後，我們在老師的協助下，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。

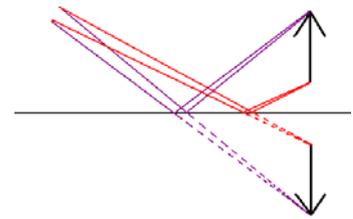


拍攝時間凌晨 3 時 3 分，地面溫度 29.25 度，氣溫 28.50 度，左圖是眼睛在望遠鏡中所見的影像，右圖是相機過度曝光後所得的影像，右圖中可明顯看到假積水區。拍攝位置和物體距離 75 公尺，相機鏡頭中心位置距地高 22.0cm。

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。我們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

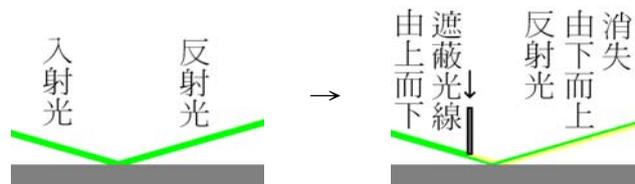


平面的成像

## 2. 以高功率雷射光束直接看光的路徑。

我們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。我們希望可以看見雷射光束以接近 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，我們將 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，我們很怕我們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，我們做了一個小小的檢測，我們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）



由於我們在網路上購買的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，我們意外拍攝到一張令我們感動萬分的照片。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。

- 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。

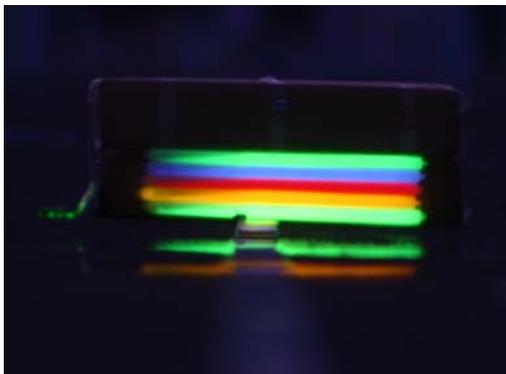
我們一直希望能夠改變地面的性質，並使得假積水區及倒影產生變化，如此一來就可以知道，物體發出的光線是經由地面反射，而非由折射和全反射使得光線彎曲向上。我們希望將地面變成一小片一小片的平面，如此一來，入射角接近90度的光線入射時，就會產生近乎漫射的效果，我們預期假積水區應該會消失。我們用500片小鏡子在地面上鋪上一排長達50公尺長、5公分寬鏡片帶，如右圖所示。



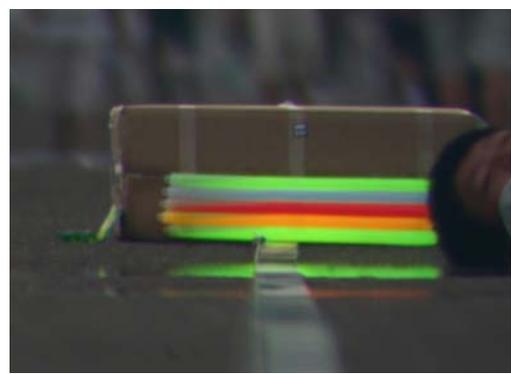
鋪設鏡片非常非常辛苦，我們在白天進行兩次小規模的實驗（200片，沒有鋪得非常整齊）都失敗後，開始質疑我們的理論是否正確，為了避免遺憾，我們在夜間利用雷射光校準，在地上釘了一條長直水紗線，並在天亮前就擺好鏡片，從半夜一直觀查到天明，第三次實驗的結果非常成功，在擺上鏡面的5公分寬度內，假積水區和倒影被嚴重改變了。



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

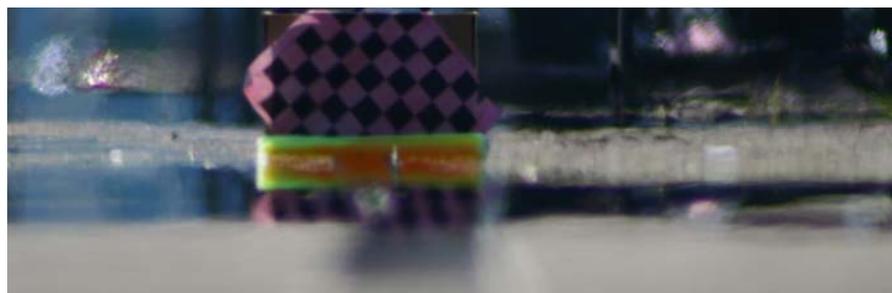
左圖：拍攝時間，凌晨4時00分。

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。

#### 4. 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，我們計畫在地面上鋪設一條長50公尺、寬20公分的黑布。因為在不同入射角下，黑布和柏油路面的反射率並不相同，因此我們預期，鋪設黑布的地方，其倒影應會改變。實驗結果，我們發現，因為黑布在光線入射角不接近90度時，其反射率比柏油路面差得多（亦即正面看起來比較黑），因此我們趴在地上看標的物時，來自其他方向的光線，經黑布反射（漫射）後，強度較低，因此不會「蓋住」標的物所反射的光線，使得假積水區變大了。



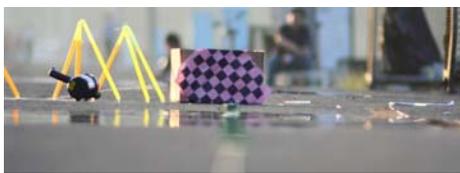
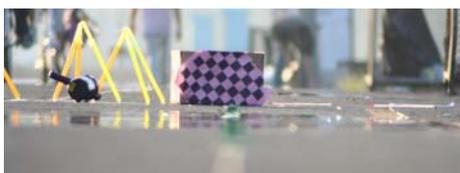
↑ 黑布

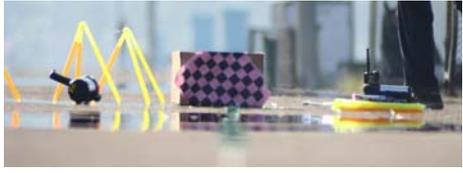
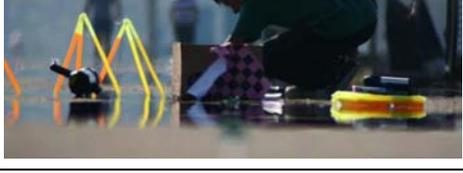
拍攝時間，上午8時23分。觀察者和目標距離75公尺。

5. 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。

我們認為，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。我們以兩個不同的角度，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，這和我們的理論是吻合的。

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	

## 6. 在夜間觀察PU跑道上的假積水現象和倒影。

為了探求為什麼白天的假積水區比夜晚大，我們希望找到非柏油路面的假積水現象，有了夜間的經驗後，我們知道夜間比白天更可以清楚的觀察假積水現象，因此我們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。

但當天老師帶著他的小兒子一起出門，他很好奇，也學我們貼在地面上看遠方的螢光棒，沒想到因為他的頭比較小，因此觀測位置比我們更低，他見到了螢光棒的倒影，我們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。（當天所用的螢光棒是上下兩節接成的。）



## 7. 用人造強風來驗證沒有空氣折射也可以產生假積水區和倒影。

為了有效說明在強風中，倒影不會改變，我們在夜晚準備了15支各180W的工業用電風扇，每四公尺架設一支，往斜下方吹地面，將地面的細沙都吹起，反覆做了幾次，所拍得的影像都沒有改變。



打開電風扇



電風扇關閉後五分鐘

8. 在柏油路面上鋪上黑紙和白紙觀察假積水區和倒影。

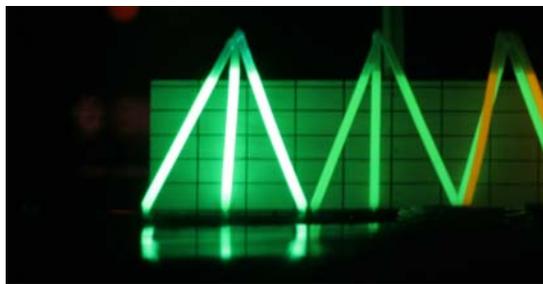
因為我們先前發現鋪上黑布以後依然可以觀察到假積水區，因此，我們認為材質不是決定可否觀察到假積水區的重要關鍵，顏色才是。我們在柏油路面上鋪上黑壁報紙和白壁報紙，結果發現鋪黑壁報紙的假積水區變大了，而鋪白壁報紙的假積水區被破壞了，這是因為白色的材質在入射角不大時就有不錯的反射率，因此反射了太多「雜訊」，使得假積水區被「蓋住了」。



(五)在實驗近期(2006年十一月~2007年二月)的觀察結果。

1. 在寒流來襲時的夜間進行實驗，地面與空氣層無溫差時，觀察積水區內的倒影。

2007年2月3日寒流來襲，在凌晨零時後，地面上一公分與地面間的溫差已不可測得(當天白天地面與地面上一公分的溫差最大可達攝氏10度)，但假積水區內的倒影依然清晰可見。



拍攝日期：2007/02/03

左圖：凌晨04時09分。地面10度、距地高1cm處9.9度。水銀燈未開啟。

右圖：晚間20時19分。地面15度、距地高1cm處15度。水銀燈開啟

在地面與空氣溫度近乎相等一段時間長時間後，路面上的假積水區及倒影依然清晰可見。

2. 將雷射筆以熱熔膠、大鋼釘固定於地面上，觀察雷射筆所發出的光徑在24小時內的變化。

2007年2月3日凌晨3時，地面攝氏10.9度、離地1cm處攝氏10.5度，將雷射筆調整至射擊地面，並發生單向反射後，確實固定住雷射筆與作為標的物的木箱。

在早晨6：30時，地面攝氏9.2度、離地1cm處攝氏9.0度，雷射光束射擊地面的光點向雷射筆靠近，且不再發生單向反射。

在下午1：20時，地面攝氏42.0度、離地1cm處攝氏29.8度，雷射光束不再射向地面，而是在空氣中前進，並直擊標的木箱。

在下午6：25時，地面攝氏17.0度、離地1cm處攝氏17.0度，雷射光束打向地面，且發生單向反射，反射光射向標的木箱。

上述的觀測，給予我們在實驗中期所提出，因為空氣些微折射造成假積水區變大的理論，更多的支持。



單向反射光束



標的木箱



固定在地上的雷射筆

3. 在狂風中觀察積水區內的倒影。

2007年2月2、3日的下午，仁義潭大壩上間歇性的大風不斷，陣風來襲時，連放在大壩上的金屬垃圾桶及工業用電風扇都會被吹倒。3日下午在同一時間就有十餘架特技風箏在同時炫技，此時假積水區內的倒影，因空氣層的擾動晃地非常劇烈，在相機的觀景窗中，「風」的流動清晰可見，無奈相機拍不出「風」，但是無論如何，即使我們用工業用電風扇再外加向下吹的強風，假積水區依然存在，位置也沒有太大的改變。

4. 寒流來襲時連續30小時定點觀測假積水區及假積水區內倒影變化。

於2007年2月2日下午1時~2007年2月3日晚間8點進行長達30小時的多點觀測，並在部分地面上鋪上黑紙及白紙，得到了同一地點24小時，溫層、照度及假積水現象的詳細紀錄，但由於照片、照度及溫度紀錄繁多，經過了一天，仍尚未整理完畢。

## 五、結論

1. 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：

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。
- (5) 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。
- (6) 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。
- (7) 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。

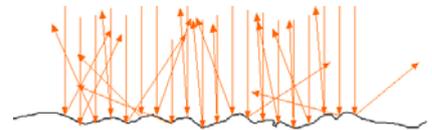
2. 物體發出的光可能可以經由柏油路面反射成像的證據：

- (1) 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。

3. 建立粗糙面單向反射的模型

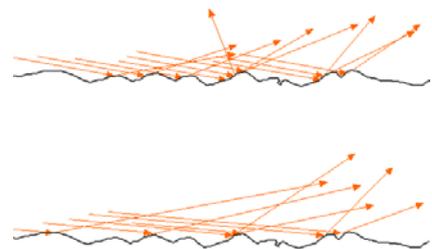
(1) 模型的建立

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。



(2) 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。



4. 白天假積水區會增大的原因：

溫差並不能產生柏油路面上的假積水現象及倒影，卻會對這個現象影響甚深。在我們自清晨五點至八點，每五分鐘拍攝一張照片，發現隨著地面溫度的升高，假積水區會越來越大，這個影響非常地明顯。

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。

因為這個原因，使得天氣越炎熱，假積水區會越大。因而使得許多人誤會，唯

有在天氣炎熱的天氣，才会有假積水區的產生，並得到「假積水區及倒影的產生，是因為物體所發出的光經空氣的折射及全反射所造成。」這個錯誤的結論。

#### (五)總結：

我們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，原本我們只是想量測這個現象的一些性質，我們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，我們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，逼使我們相信我們所見，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，我們是非常惶恐的，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，讓我們開始有突破性的進展，我們直接用雷射光看見粗糙面單向反射的現象，這使得我們信心大增，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們的想像，所幸在學校眾多自然科老師的建議及幫忙下，我們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、實習老師們給予我們重大的幫忙，協助我們在半夜架設器材、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。



經過我們幾個月來的觀察及實驗，我們大膽地說：「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



## 評語

本實驗十分有創意，以實驗方法來懷疑傳統的看法，作者是高中生，十分難得。如能加強數據的量化，將是十分好的研究。