

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

第一名

040119

國王的海市蜃樓

學校名稱： 國立嘉義女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 李璇	莊立山
高二 陳冠樺	莊立帆
高二 戴君容	

關 鍵 詞：海市蜃樓、假積水現象、單向反射

國王的海市蜃樓

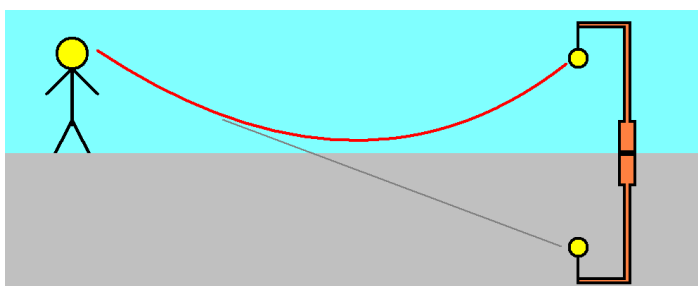
柏油路面上倒影的成因

壹、摘要

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。



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。」

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。

在雲嘉區科展中，我們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。但評審老師認為，我們所持的僅是間接證據，況且，我們可能發現了柏油路面上產生倒影的另一個機制，但並不能駁斥在豔陽高照時，會因為折射和全反射造成倒影的可能性。

我們在區賽後再接再厲，終以改變地面性質使積水現象消失，駁斥「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。揭穿了這個「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，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，就是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，也是在日常生活中很常出現的現象。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。

由於我們對這個現象很有感興趣，回家後又進一步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，但我們卻對海市蜃樓的模擬圖感到懷疑。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？這些疑問激起我們親自探究海市蜃樓的真正成因。

參、研究目的

- 一、探討柏油路面上假積水現象和倒影的成因。
- 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、研究設備與器材

一、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
雙筒望遠鏡	數副
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

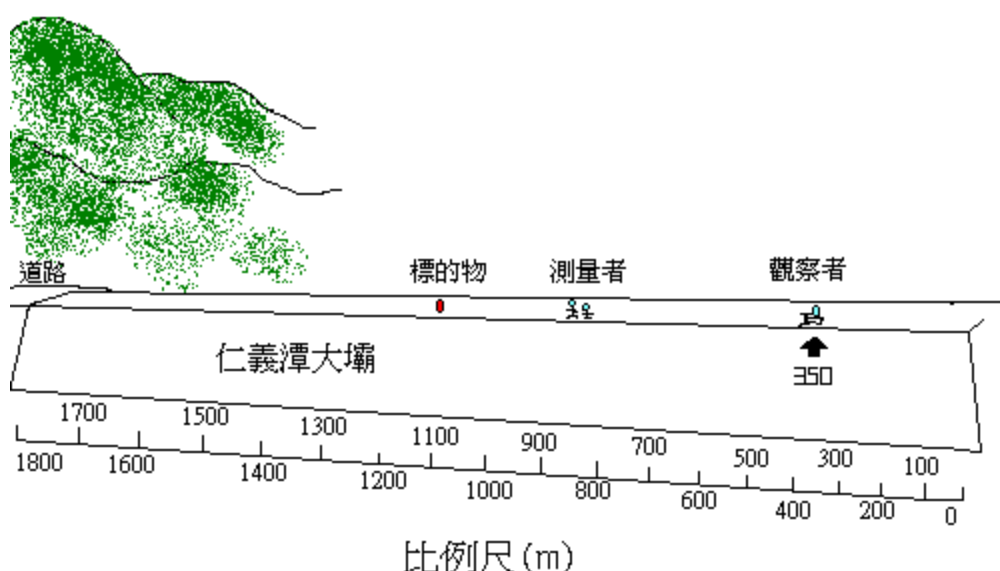
二、次要器材：

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	一組
施工危險警戒線	數捆

伍、實驗過程與方法

- 一、我們研究的地點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理由主要為步道平坦筆直，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。

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，方便我們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。



- 二、雲嘉區科展前主要是在日間進行實驗，區賽前所進行的實驗內容：

- (一) 在不同位置觀察柏油路面上的假積水現象和倒影。
- (二) 用「大頭針法」描繪光在空氣中的路徑。
- (三) 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。

- 三、全國科展前主要是在夜間進行實驗，研究地點依然相同，但重新找尋良好的觀察及被觀察位置，並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) 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。

陸、研究結果

一、雲嘉區科展前的實驗結果

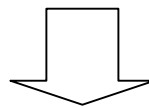
(一) 在不同位置觀察柏油路面上的假積水現象和倒影。

觀察者的高度會影響蜃景的出現與否。當觀察者蹲下時，所看到的蜃景的範圍會大幅度的向觀察者方向前移且較明顯。

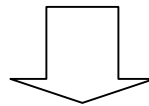
而當我們向前進的時候，眼睛所可以看到的蜃景將逐漸後退。因此，當觀察者前進時，所觀察的目標物的蜃景會消失，但當觀察者在此位置蹲低一些時，目標物的蜃景又會再次出現。



觀察者站著觀察



觀察者半蹲觀察



觀察者貼地觀察

(二) 用「大頭針法」描繪光在空氣中的路徑。

在高中光學實驗中，我們利用「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。

(三) 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。

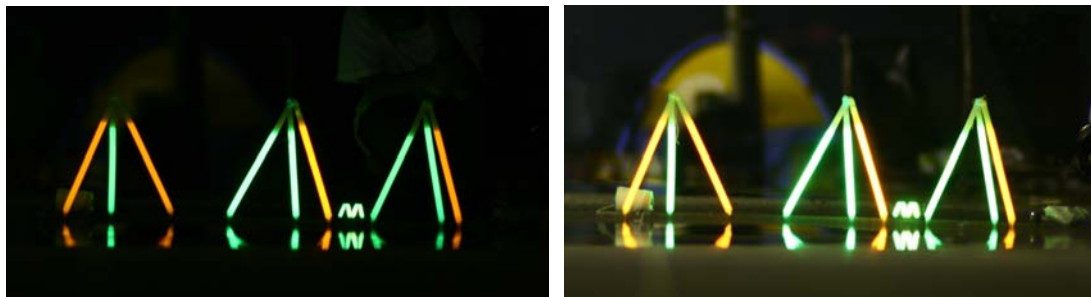
我們希望可以在物體和觀察者之間灑大量的冰塊，降低路面溫度，觀察假積水現象和倒影的變化，以釐清假積水現象和近地表高溫空氣層之間的關係。

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，因為我們場地實在太大，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。我們在觀察同學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。

二、全國科展前的實驗結果

(一) 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，拍攝也非常困難，在多次的尋找後，我們成功地拍下清晨前清晰的倒影。證明了假積水現象在地面溫度和氣溫接近時，仍然是可能發生的。

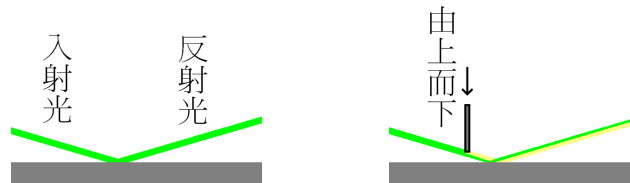


凌晨3時3分，地面溫度29.25度，氣溫28.50度，左圖是眼睛在望遠鏡中所見的影像，右圖是相機過度曝光後所得的影像，右圖中可明顯看到假積水區。拍攝位置和物體距離75公尺。

(二) 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。（見圖）



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12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時，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，使得上半部直進，下半部反射，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！**（見圖）



拍攝時間，凌晨4時44分，柏油路面上的反射區距離雷射筆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，如圖所示。

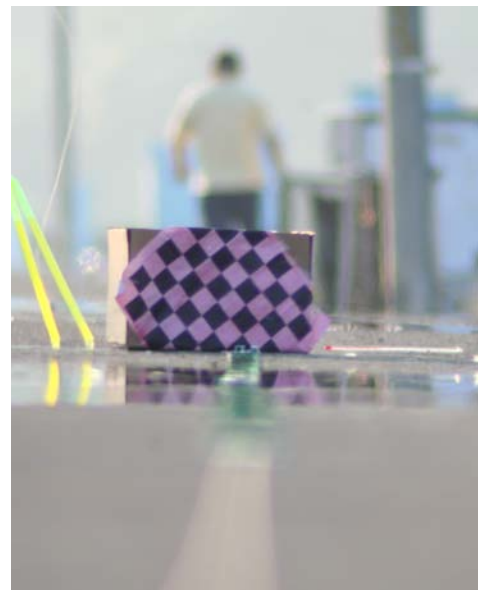
鋪設鏡片非常非常辛苦，我們在兩次的實驗失敗後，開始質疑我們的理論是否正確，為了避免遺憾，我們在夜間利用雷射光校準，在地上釘了一條長直水紗線，並在天亮前就擺好鏡片，從半夜一直觀查到天明，第三次實驗的結果非常成功，在擺上鏡面的 5 公分寬度內，假積水區消失、倒影消失。



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，頂多只是略微改變空氣層，而且地面越高，積水現象應越明顯才是，但是照片中卻出現了明顯的不連續現象，鋪設鏡子的地方，積水區和倒影消失無蹤，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28分。

右圖：拍攝時間，清晨6 時4 分。

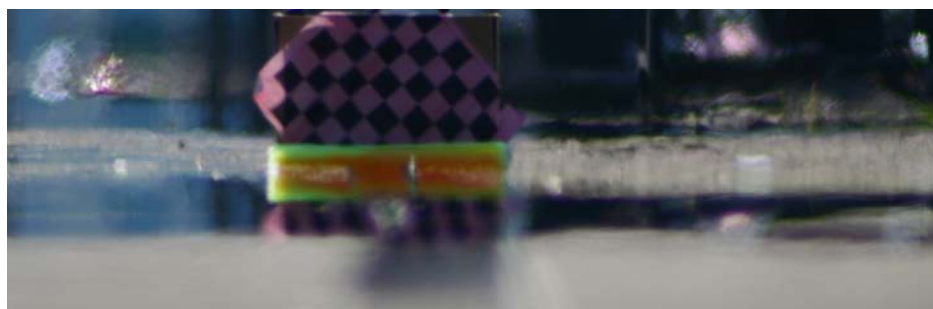
在兩圖中均可清楚的見到鋪設鏡子的區域，積水區及倒影消失了。

(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，我們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，因此我們預期，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。











黑布













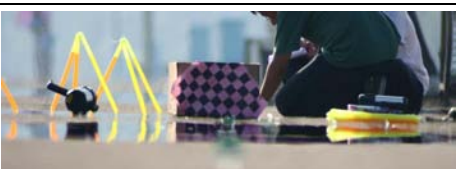







拍攝時間，上午 8 時 23 分。觀察者和目標距離 75 公尺。







(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。我們可以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	
	05 : 40 27.30	
	05 : 50 28.17	
	06 : 00 28.43	

	06 : 10 29.07	
	06 : 20 30.87	
	06 : 30 30.30	
	06 : 40 30.40	
	06 : 50 31.73	
	07 : 00 33.27	
	07 : 10 34.97	
	07 : 20 34.33	
	07 : 30 36.53	
	07 : 40 38.63	

	07 : 50 39.23	
	08 : 00 40.00	
	08 : 10 40.10	

柒、討論

一、傳統說法，因為光在空氣中折射及全反射就造成假積水現象，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) 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。

二、光可能透過地面反射成像的原因：

- (一) 雷射筆以入射角接近90度時射向地面，可以產生單向反射。

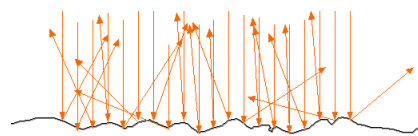
三、在短距離柏油路面上的假積水現象，不是光在空氣中折射及全反射所造成的，因為

- (一) 不論白天或夜晚，用小鏡子鋪成一條細長條的鏡子後，假積水現象及倒影即消失。而此時，空氣層的溫度分佈，不應有太大的改變。

四、建立粗糙面單向反射的模型

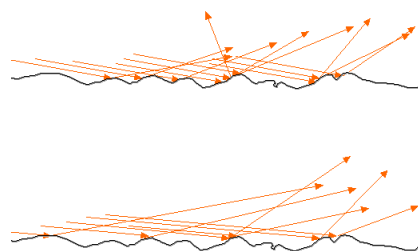
(一) 模型的建立

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。



五、溫差造成光在空氣中折層，對柏油路面上的積水區及倒影的影響：

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，才會有假積水區的產生，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。

捌、結論

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。

在整個實驗中，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，我們常因為這個模型爭吵，有人贊成，有人反對。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。指導老師建議我們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，堅信我們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，完全被摧毀。

這個實驗在量測及拍攝上的困難遠遠超過我們的想像，所幸在我們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，四點二十天就漸漸亮了，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，是由於天氣炎熱，使得光線折射之後，已近乎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，我們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。」

捌、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

評語

040119 國王的海市蜃樓

本作品觀測到可引發似海市蜃樓的另一物理條件。作者在低反射角的區域範圍觀測到小角度反射的影像。雖然所觀測到的現象並尚未有足夠的實驗證據支持所提之解說，但可引發進一步的探討，利用可控物理參數下，証實小角度反射之似海市蜃樓之現象，可就算是一項重大的發現。