中華民國 第50屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組　地球科學科

第三名

080502

月神阿提米斯（Artemis）的傷疤~月球隕石坑和輻射紋之模擬與探討

學校名稱：嘉義市西區興嘉國民小學

作者：	指導老師：
小六 李育叡 小六 陳淑盈 小六 蔡佳穎 小六 蔡佳宏	拱玉郎

關鍵詞：隕石坑、輻射紋、光譜

月神阿提米斯(Artemis)的傷疤

~ 月球隕石坑和輻射紋之模擬與探討

摘 要

以「方格紋路」標記砂土表面，方便觀察撞擊時表面的詳細受力情形。利用「紅土球」撞擊砂土的過程中，紅土球會成功碎裂，並且會產生「輻射紋」、「中央峰」與「環形山」等地形，此隕石撞擊模型是我們自創的，而且效果相當良好。玻璃彈孔的「橢圓形延伸碎裂區」橢圓軸的方向和「最大破裂痕方向」均會和「射擊方向」一致。利用輻射紋之「長短軸比值」和「射擊角度」之間的「標準曲線」，可反推出第谷坑、哥白尼坑、刻卜勒坑和阿里司塔克坑的撞擊角度。發射器以低角度射擊時，能以「打水漂」方式模擬出「連續隕石坑」。砂子和石灰粉都能藉由橡膠彈力球之撞擊，在反彈後可以產生「多重環形山」，可證實「不一定只有液體」才能製造出「多重環形山」。我們藉由 $h= S\cdot \tan\theta$ 公式，可以利用「上弦月」平面相片求得隕石坑的深度。使用自製 CD 光譜儀，能分析出隕石坑之間的 RGB 值和 HSB 值之差異性，CD 光譜儀分析所得的資訊量遠多於一般的月亮黑白相片。

壹、研究動機

我們在四年級的「善變的月姑娘」單元（南一版）學習過月亮的觀察，在本校舉辦的觀星活動，我們也曾利用天文望遠鏡仔細觀察過月球的輻射紋、環形山、中央峰等地形，因而引起我們研究月球地形的興趣。

1994 年人類驚奇觀察到舒梅克－李維九號彗星（**Shoemaker-Levy 9**）的 **21** 個塊碎片連續猛烈撞擊木星。**2008** 年 **10** 月另一顆直徑爲 **5** 米的小行星（**2008 TC3**）準確撞擊非洲 蘇丹，這是天文學家首次對小行星撞擊地球過程精確預報。此外，恐龍毀滅亡原因以及美國亞歷桑那州著名的巴林傑隕石坑，都一再提醒我們地球不斷受到小行星和隕石的威脅。

月球因爲沒有氣流也不會下雨，而存在大量保存良好的隕石坑，只要將望遠鏡朝向夜空，月球就是我們最好的隕石坑觀察對象。在四年級的「美麗的彩虹」單元有學到三稜鏡能將太陽的白光色散成七種顏色的光譜。想藉由我們創意的模擬設計，推測這些月球地形造成的原因，並探究蘊含其中的有趣現象。

貳、研究目的

【研究一】、隕石坑的模擬與結構觀察

【研究二】、不同的撞擊條件對隕石坑的影響

【研究三】、隕石坑的「梯田隕石坑壁」之模擬與探討

【研究四】、「輻射紋」與「連續隕石坑」之模擬與探討

【研究五】、「多重環形山」產生之原因探討

【研究六】、利用月亮相片估算隕石坑寬度
【研究七】、以上弦月相片估算隕石坑深度，並觀察隕石坑陰影變化速率
【研究八】、隕石坑的光譜之初步分析

參、研究材料和設備

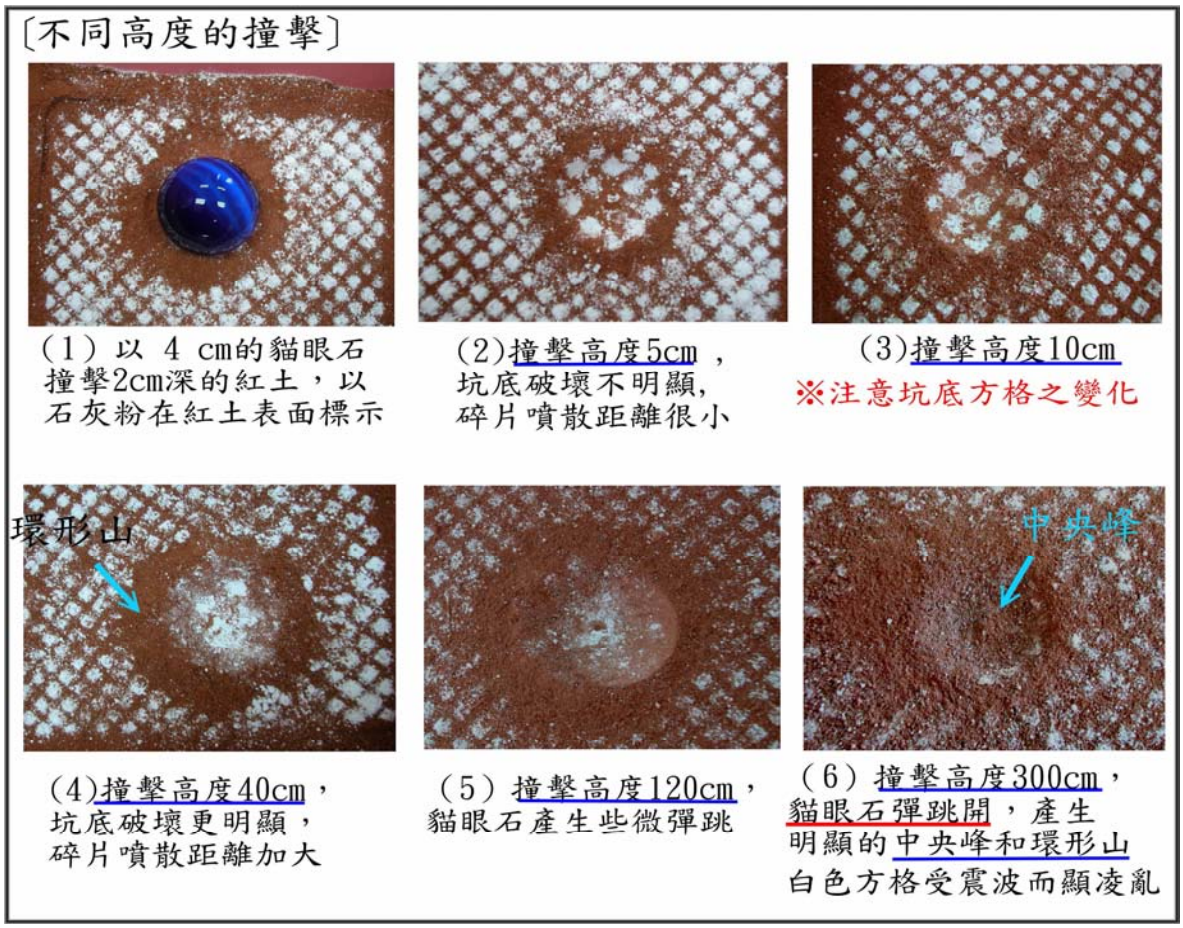
【材料】(1) 自製發射器 (2) 鋼珠、彈珠、貓眼石、紅土球 (3) 砂子、石灰粉、紅土 (4) 直尺
【工具】(1) Vixen 天文望遠鏡 (2) PhotoImpact 12 (3) Google 地球 5.0 (4) 星空模擬軟體 Starry Night Pro Plus 6 (5) 月球模擬軟體 Virtual Moon Atlas Pro 4.0

肆、研究過程和方法

【研究一】、隕石坑的模擬與結構觀察

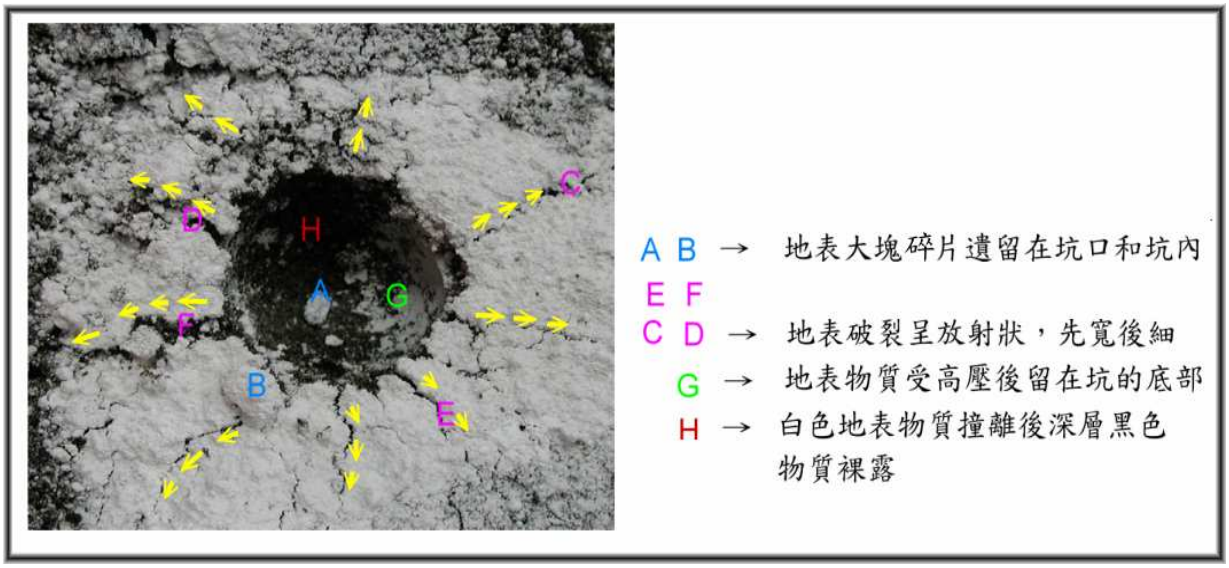
【1.方格紋路實驗】

【圖 1】以石灰粉的「方格紋路」標記紅土表面，方便觀察撞擊時表面詳細的受力情形



【上圖實驗條件：【圖 1】-（6）貓眼石撞擊高度較高而彈開，【圖 1】-（1）～（5）都是貓眼石都停留在原來的撞擊洞口，再將貓眼石移開後觀察隕石坑內的方格條紋之變化】

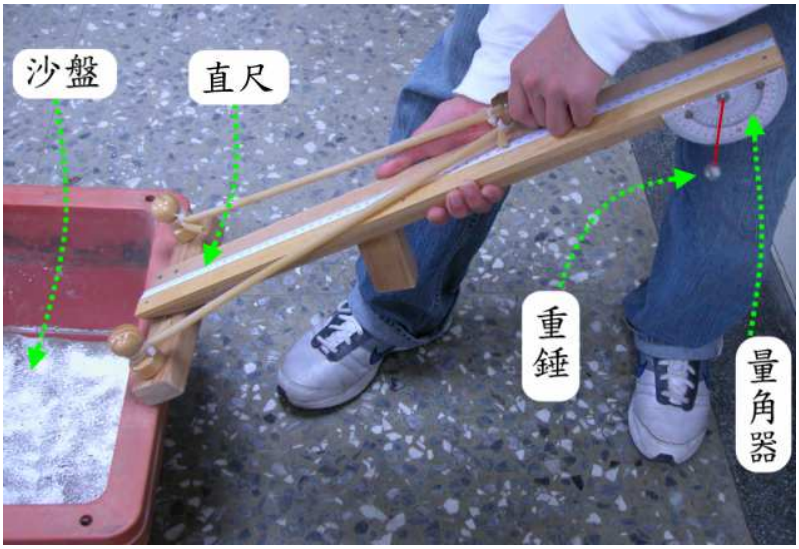
【圖 2】在砂子上面灑白色石灰粉可以幫助仔細觀察坑底及坑壁不同的受力情形



【上圖的實驗條件：銅球 2cm 直徑，由 1 公尺高自由落體方式撞擊，砂坑黑砂 5cm 厚，表面灑白色石灰粉，銅球夾離原坑洞後再觀察】

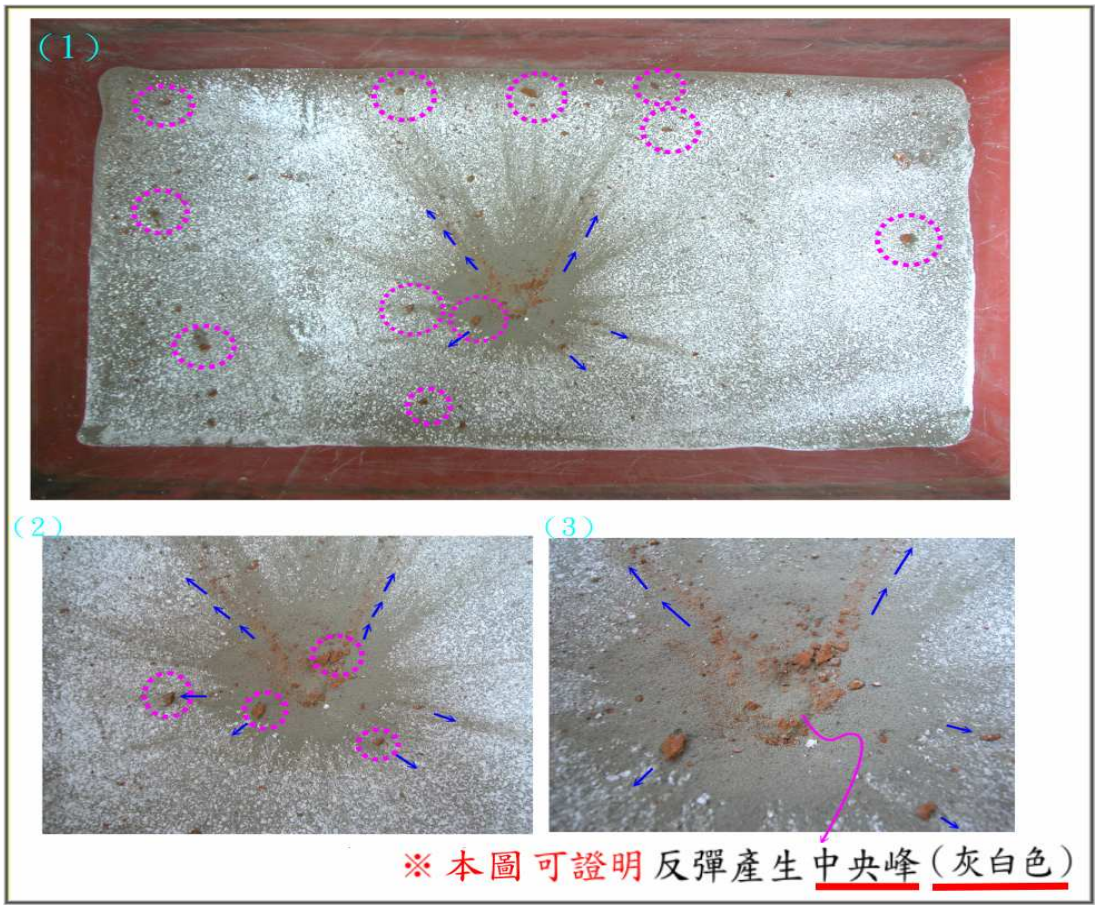
【2. 發射器的自製與設計】

【圖 3】我們自己設計的發射器。藉由重錘和量角器之設計，能方便控制「發射角度」。藉由直尺可讀取橡皮筋伸長量而測量得「射擊力道」。



【3. 紅土球撞擊實驗】

【圖 4】「紅土球」撞擊瞬間會碎裂開，更接近真實的隕石撞擊，這是很棒的隕石撞擊模型設計。撞擊後會產生漂亮的「輻射紋」、「中央峰」與「環形山」。若仔細觀察其中【圖 4】-（3），會發現中央峰的小土丘是由「灰白色砂子構成」，不是由紅土球碎片所構成，這是代表中央峰是由地表反彈的力道所構成的強力證據。注意圖中的大碎片（粉紅色的圈圈）有遠也有近，可見隕石在碎裂時是由上下四面八方各方向散開。本模型比「他人科展作品」【參考資料 1】效果來的好，該科展作品是以「濕石膏」作爲被撞擊的材料，鐵珠衝撞時會被濕石膏黏住，很難造成鐵珠「跳離」原坑洞，這與真實隕石撞擊會碎裂噴散的情形差異甚大。

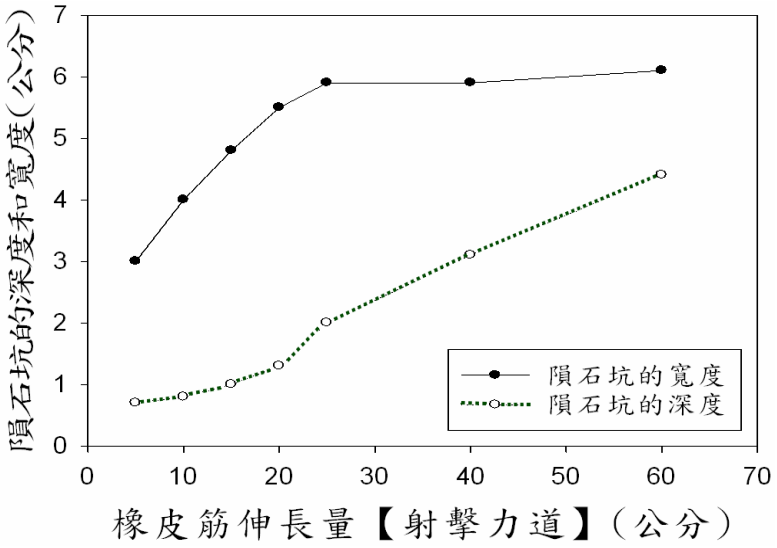


【上圖實驗條件：以沙紙將土球磨成直徑 2cm 的圓球，發射器伸長量 60cm，射擊角度 80 度，砂子 1cm 深，表面灑以石灰粉，砂子底下墊木質合板】

【研究二】、不同的撞擊條件對隕石坑的影響

【1.「撞擊力道」對隕石坑的「寬度」與「深度」之影響】

【圖 5】「撞擊力道」越大隕石坑的「深度」和「寬度」會越大。但隕石坑的「寬度」增加到一個程度後就不再增加，所以隕石坑寬度具有極大值。

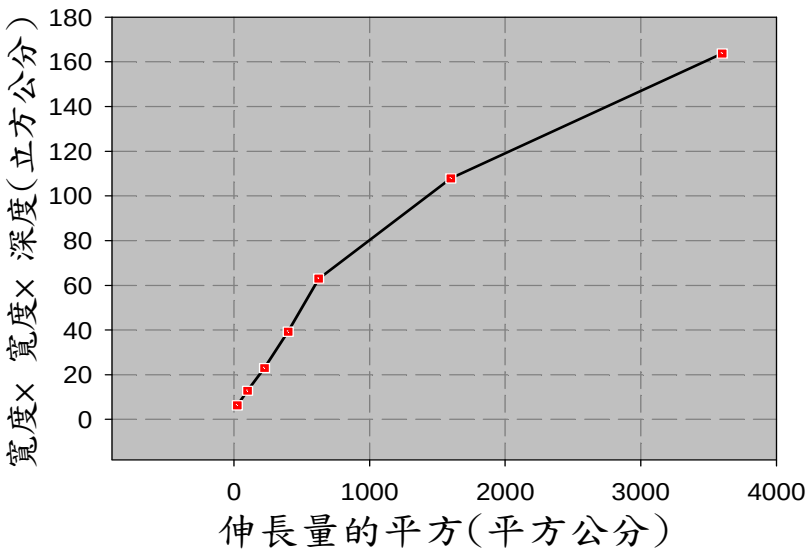


【上圖實驗條件：1.5cm 玻璃珠，砂坑：9cm 厚的砂子，發射器射擊角度 90 度】

【2. 彈力位能對隕石坑的（寬x寬x深）之影響】

【圖 6】當「彈力位能」越大時，隕石坑的（寬x寬x深）也會越大。因爲彈力位能可以轉換爲彈珠的動能，所以本圖可以視爲「彈珠動能」與「隕石坑體積」的關係圖。當隕石動能越大，造成的隕石坑的體積也會越大，其中曲線上升趨勢是漸緩且下壓的，代表隕石的動能越大，隕石坑的體積並不是等比例變大，甚至可能存在著極大值。

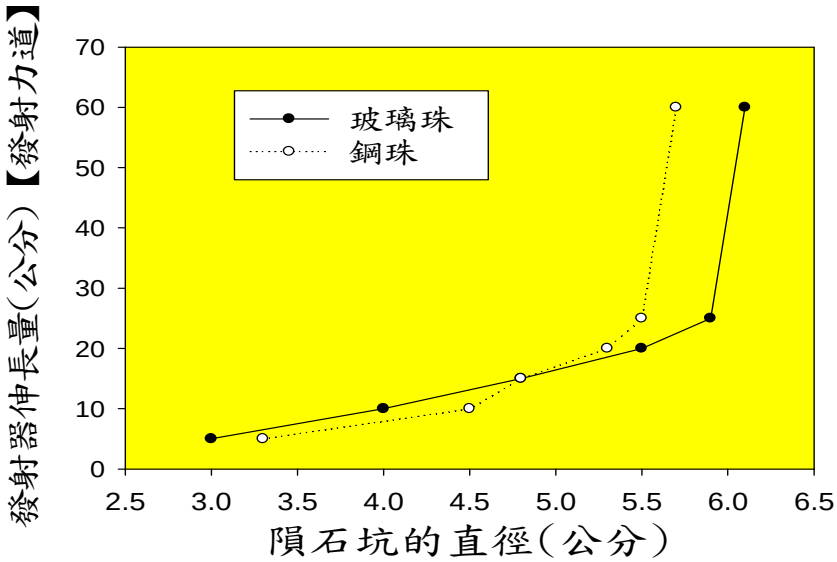
【註：彈力位能＝1/2・K・$\triangle X^2$，其中 K 爲彈力常數，$\triangle X$ 爲伸長量】



【上圖實驗條件：1.5cm 玻璃珠，坑底：9cm 深砂子，射擊角度 90 度】

【3. 最大隕石坑實驗】

【圖 7】固定大小的隕石究竟能撞擊出直徑多大的隕石坑呢？這是個很有趣的問題。射擊力道越大，隕石坑直徑也越大，但是圖中曲線最後垂直上升，可見固定大小的隕石所撞擊出的隕石坑的直徑，具有極大值。



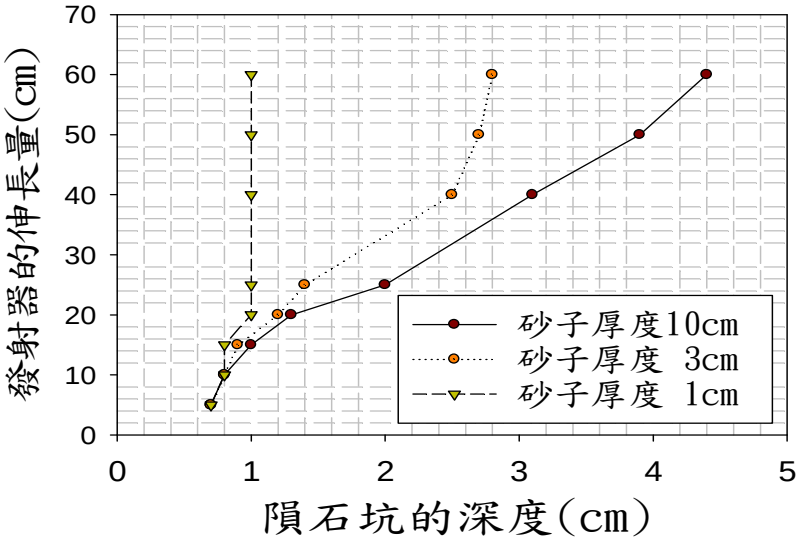
【上圖實驗條件：鋼珠直徑 0.9cm，玻璃珠直徑 1.2cm，坑底：1cm 深砂子，垂直射擊】

【圖 8】最大隕石坑實驗。以 0.9cm 的鋼珠最大可撞出鋼珠直徑 9 倍左右的隕石坑。砂坑下方墊木質底板，質地會比全部都是砂子時來的堅硬，可以增加反彈力道，反而能震出更大的隕石坑。推測月表的隕石坑的直徑和月球地表的硬度有很大的相關性。

【上圖實驗條件：砂坑厚 2cm 下方墊木板，鋼珠直徑 0.9cm，發射器伸長量 60cm。】

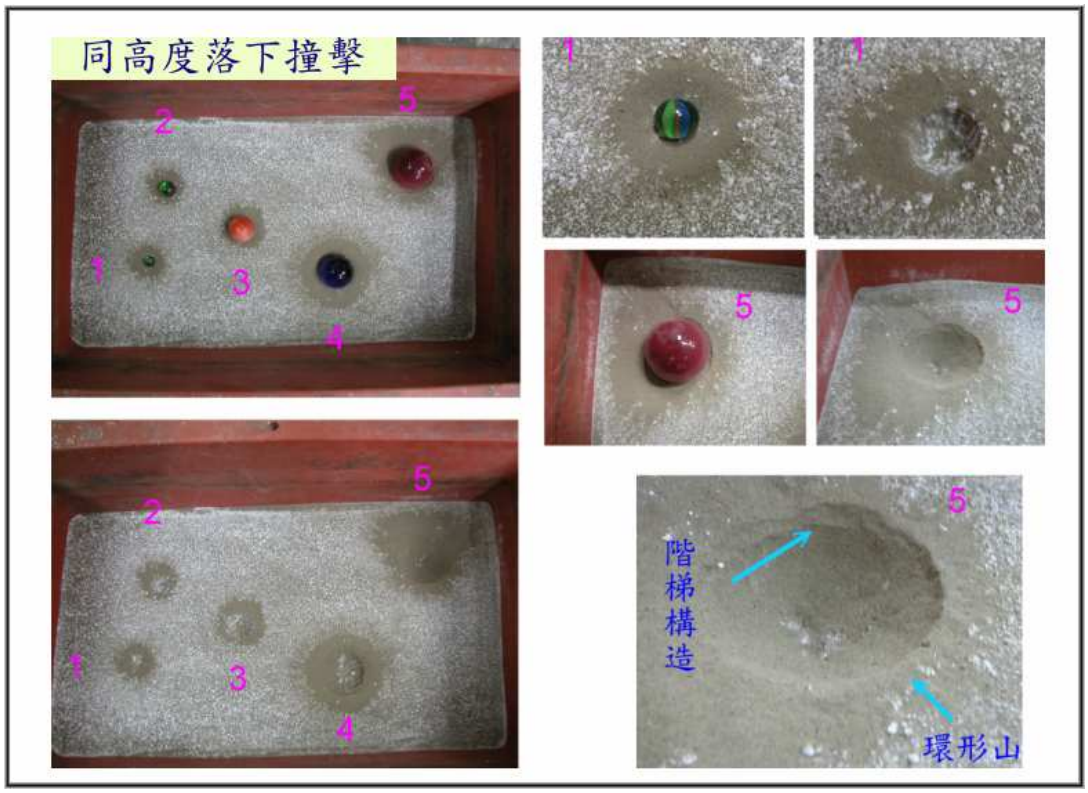
【4. 撞擊力道對隕石坑深度的影響】

【圖 9】撞擊「力道越大」撞擊出的「隕石坑深度」會愈深。但是砂子淺時則越容易直接打到底部的木板，因而影響隕石坑的深度。



【5. 不同大小的珠子以同高度撞擊對隕石坑之影響】

【圖 10】No.1～No.5 不同重量的珠子，以自由落體方式在同高度落下撞擊。因爲位能(mgh)不同，轉換出不同大小的動能。當珠子越大時，撞出的環形山越大，深度和直徑也越大，結構也越複雜。

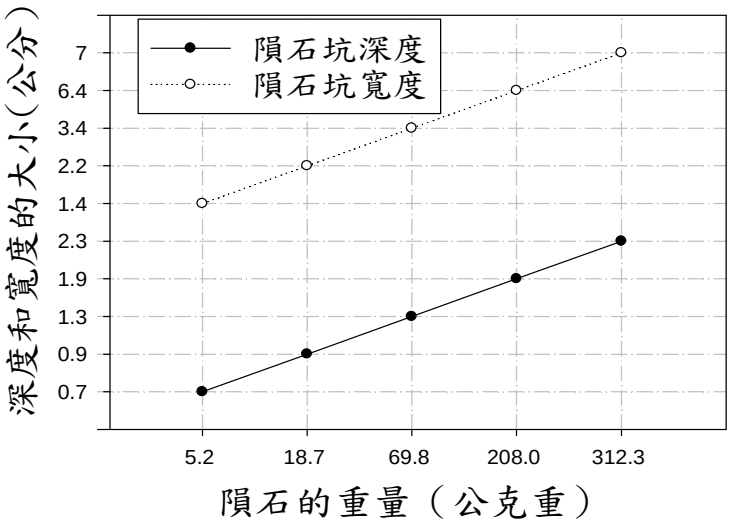


【表 1】No.1～No.5 不同重量的珠子對隕石坑的「直徑」和「深度」之影響。

珠子編號	No.1 玻璃珠	No.2 玻璃珠	No.3 貓眼石	No.4 貓眼石	No.5 貓眼石
球直徑大小	1.5cm	2.5 cm	3.5 cm	5.0 cm	5.5 cm
重量	5.2 g	18.7 g	69.8 g	208.0 g	312.3 g
隕石坑深度	0.7 cm	0.9 cm	1.3 cm	1.9 cm	2.3 cm
隕石坑直徑	1.4 cm	2.2 cm	3.4 cm	6.4 cm	7 cm
情形 敘述	邊緣完整 結構簡單			產生梯田 隕石坑壁	結構複雜，產生梯田隕石坑壁，環形山變明顯

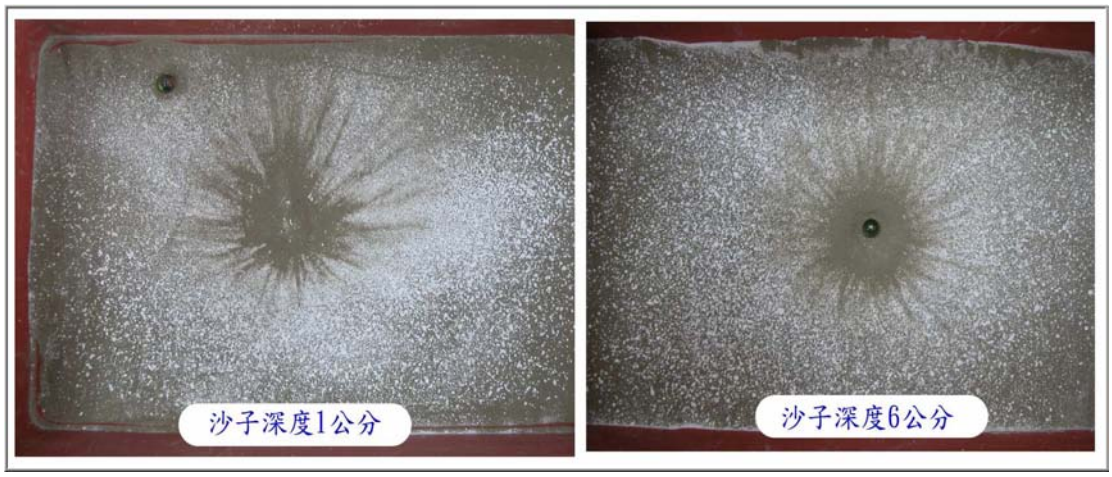
【實驗條件：珠子從 2.6 公尺高度自由落下，沙子深度 10 公分】

【圖 11】同高度落下，當隕石（珠子）越大，隕石坑之「寬度」和「深度」也會越大



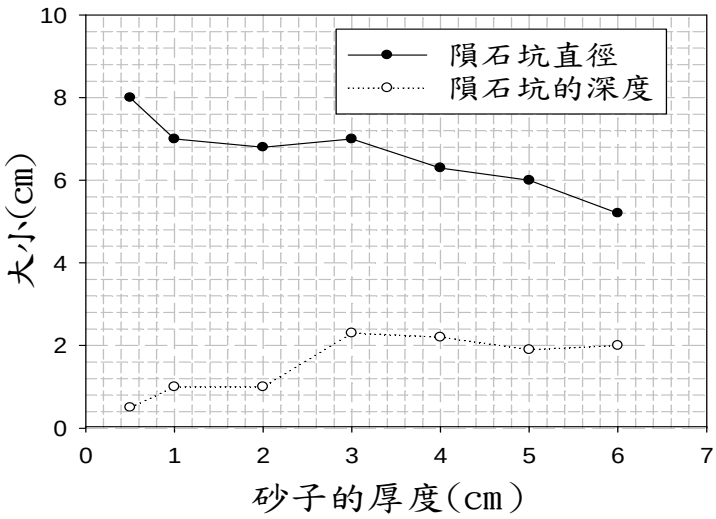
【6. 砂子厚度對隕石坑的直徑與深度的影響】

【圖 12】鋪的砂子越厚，隕石坑的直徑和輻射紋反而變小。當砂子越深則非彈性碰撞的情形越明顯，珠子的動能反而被砂子吸收，所以隕石坑的直徑越小。



【上圖實驗條件：直徑 1.5 公分 5.2 公克的玻璃彈珠，發射器伸長量 40cm，垂直射擊】

【圖 13】射擊力道固定時，當沙子越深，隕石坑的直徑反而越小。當沙子越深則非彈性碰撞會越明顯，珠子的動能反而被沙子吸收，所以坑的直徑減小。沙子淺時力道易傳到沙盤底部，而發生反彈，所以坑的直徑較大。

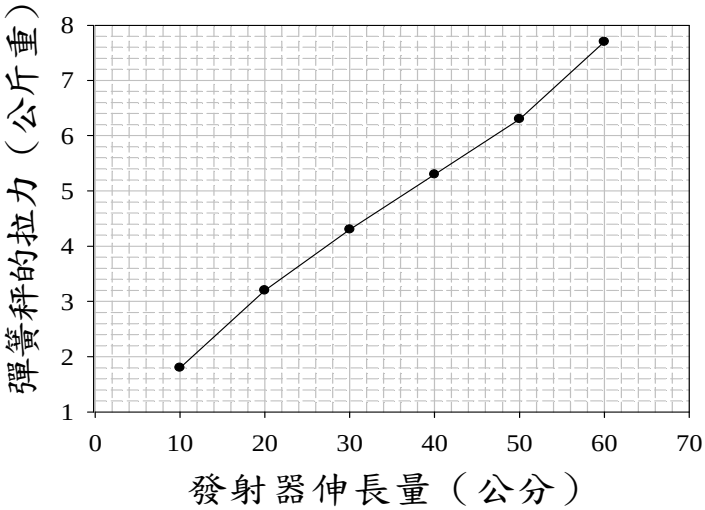


【本圖實驗條件：伸長量 40cm，垂直射擊，1.5 公分的彈珠】

【7. 發射器的射擊力道與彈力常數的計算】

【圖 14】由下圖的斜率可求得發射器橡皮筋的彈力常數 K 值。K 值爲 0.118 公斤重/公分。當伸長量爲 60cm 時，彈力可達 7.7 公斤重。以 **1.5cm** 玻璃彈珠在操場以 **45** 度仰角射擊，當伸長量爲 **60** 公分時，水平射程可達 **130** 公尺。

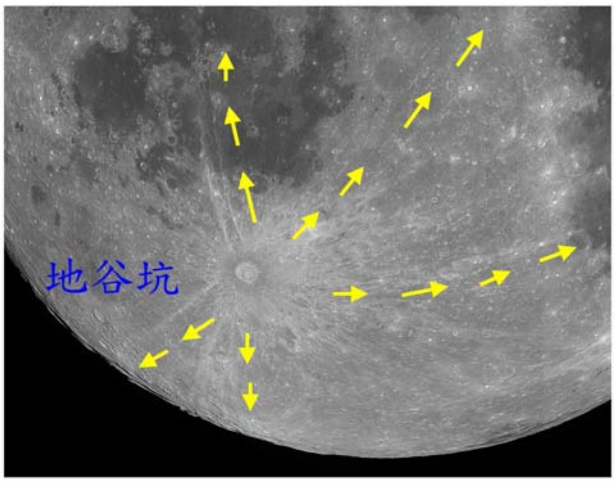
（註：彈簧的力道 F＝K・△X　，其中 K 爲彈力常數，△X 爲伸長量）



【研究三】、隕石坑的「梯田隕石坑壁」之模擬與探討

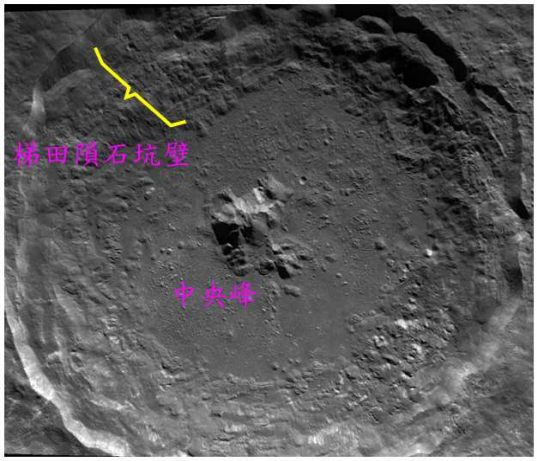
【1. 第谷坑具有典型的「輻射紋」和「梯田隕石坑壁」（terraced crater wall）】

【圖 15】月球的第谷坑—擁有最長的「輻射紋」，長度竟然可達 **1500** 公里



【拍攝設備：vixen 天文望遠鏡， Nikon coolpix 990】

【圖 16】第谷坑具有典型的「梯田隕石坑壁」和「中央峰」



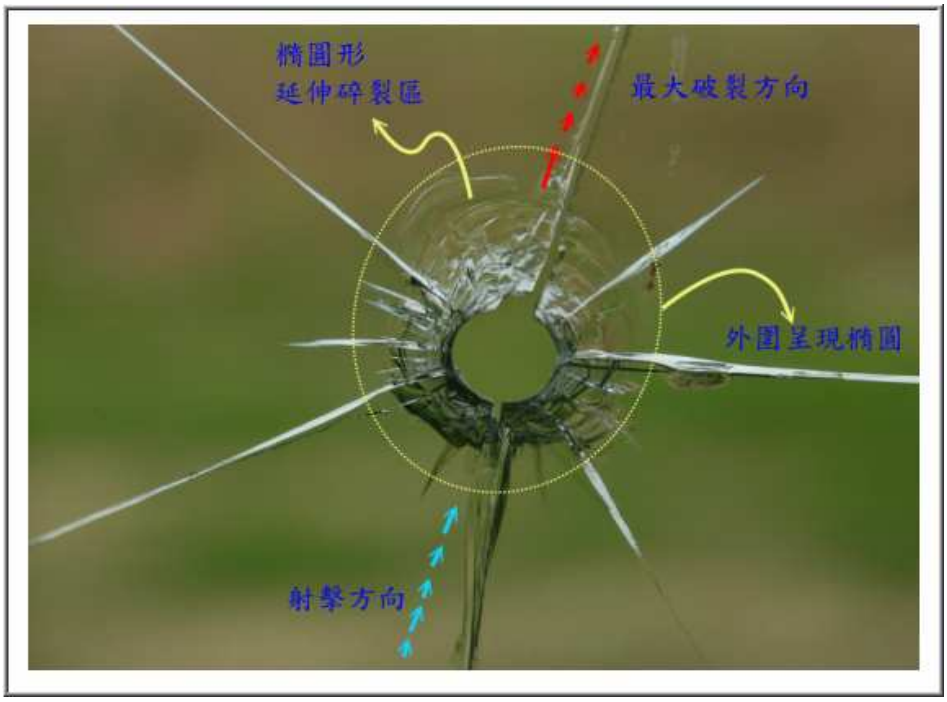
【本圖引用自 Virtual Moon Atlas Pro 4.0】

【2. 玻璃彈孔實驗】

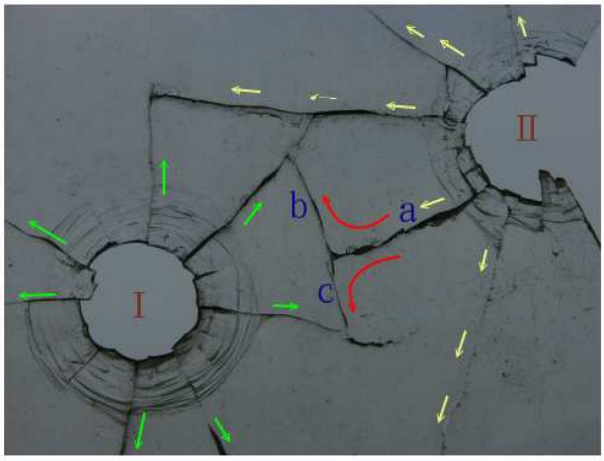
【圖 17】玻璃彈孔具有「同心圓構造」，很類似「梯田隕石坑壁」。

【說明：必須將射擊用的彈珠直徑再縮小，改用直徑才 0.3 公分的小鋼珠，使鋼珠每平方公分的能量再提高，才能撞擊出完整的小彈孔，否則玻璃會直接大片碎裂而失敗。**】**

【圖 18】「橢圓形延伸碎裂區」橢圓軸的方向和「最大破裂方向」都會和「射擊方向」三者的方向都會一致，這和砂坑實驗【圖 23】結果很類似。

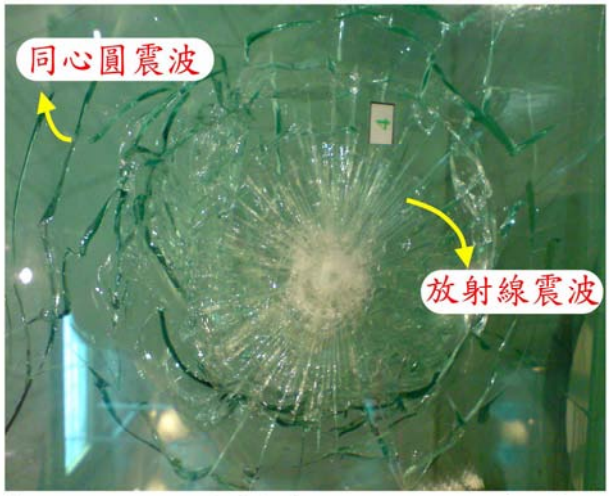


【圖 19】兩個玻璃彈孔相交接之處，容易發生「裂痕轉向」現象，而增加破裂。代表月球表面可能有類似之現象。



a點的裂痕會因為第一個彈孔（Ⅰ）的關係而產生「裂痕轉向」 b、c兩點

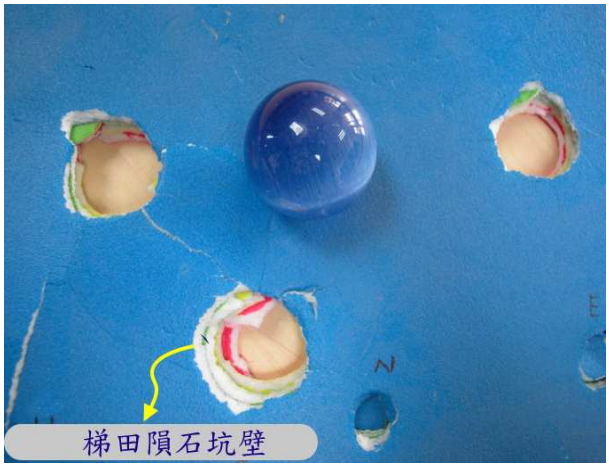
【圖 20】防彈玻璃與真實子彈彈痕。彈痕同時具有「同心圓」的震波和「放射狀」的震波



（註：此防彈玻璃厚度達3公分，子彈並未射穿，我們攝自彰化玻璃博物館）

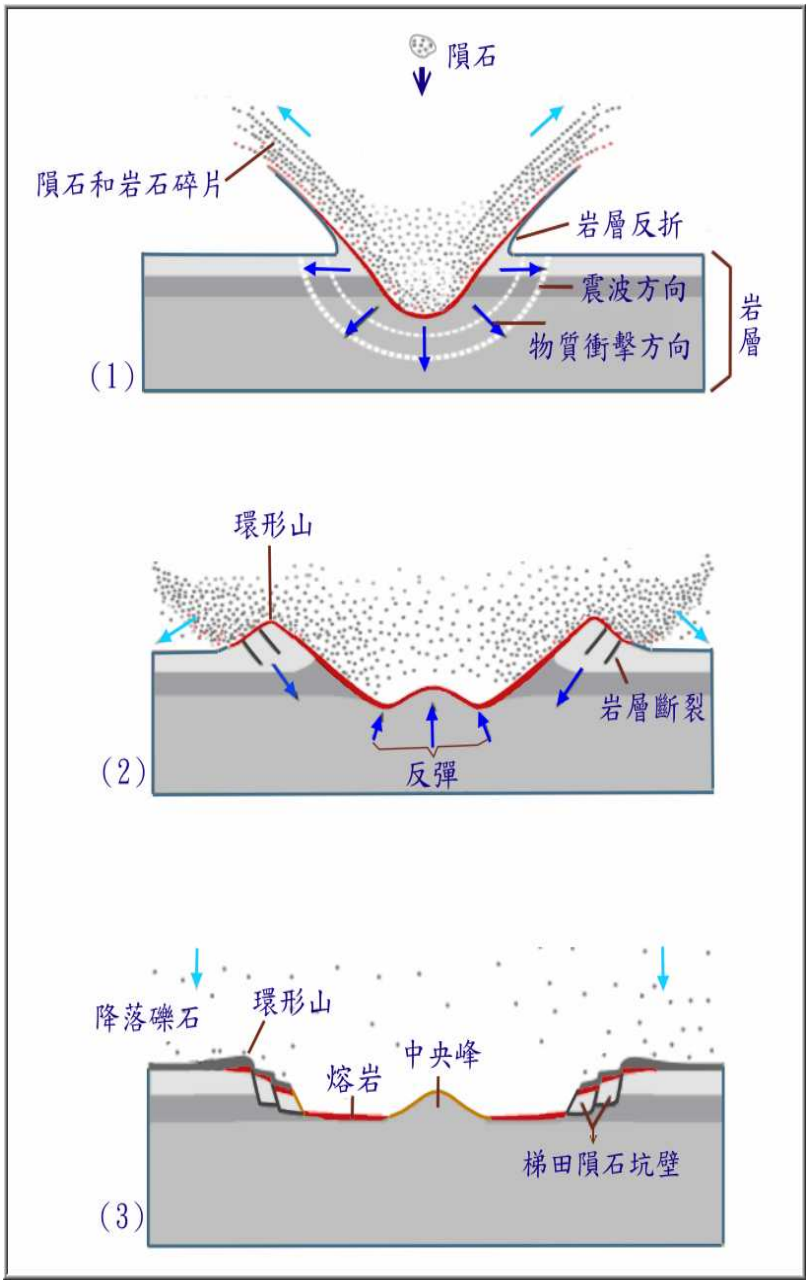
【3. 多層珍珠板撞擊實驗】

【圖 21】貓眼石撞擊「多層珍珠板」，可以產生一層一層的「梯田隕石坑壁」，本實驗可彌補砂坑實驗之不足，以改善砂坑爲均質而非層狀構造。



【4. 我們對隕石坑形成撞擊過程之歸納】

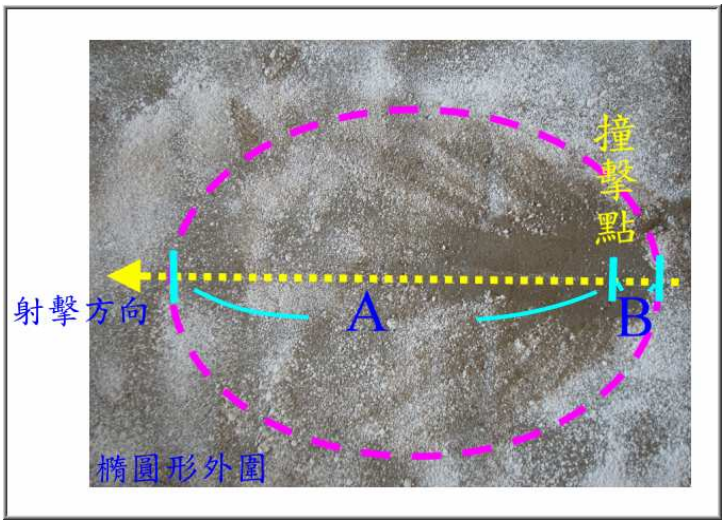
【圖 22】我們對隕石坑形成撞擊過程之歸納。本圖中的「震波方向」是「同心圓」，而「物質衝擊方向」是「放射狀」，坑底則因反彈作用而形成中央峰。



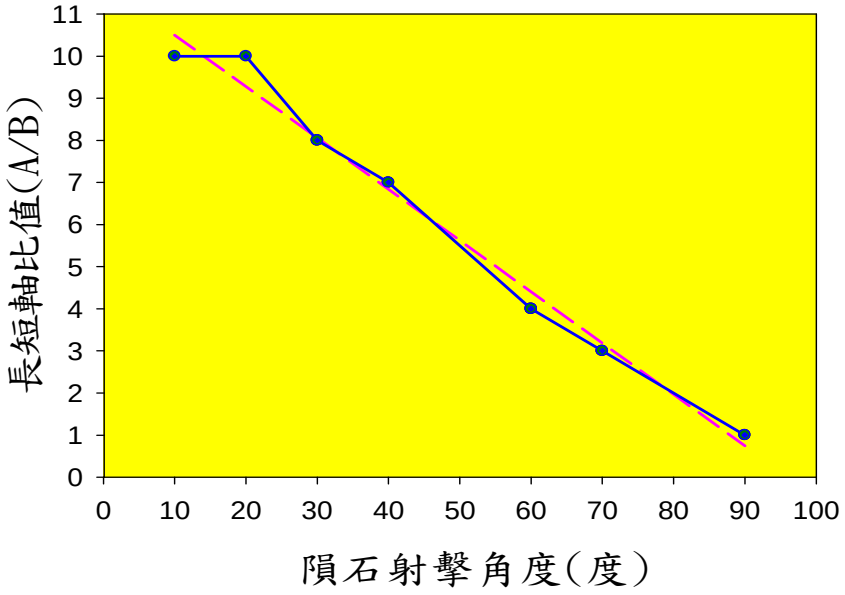
【研究四】、「輻射紋」與「連續隕石坑」之模擬與探討

【1. 輻射紋「長短軸比值」（A/B 比值）和射擊角度的標準曲線】

【圖 23】隕石坑的輻射紋長軸（A）、短軸（B）之測量方法。
當橢圓形越扁，則 A/B 比值越大。



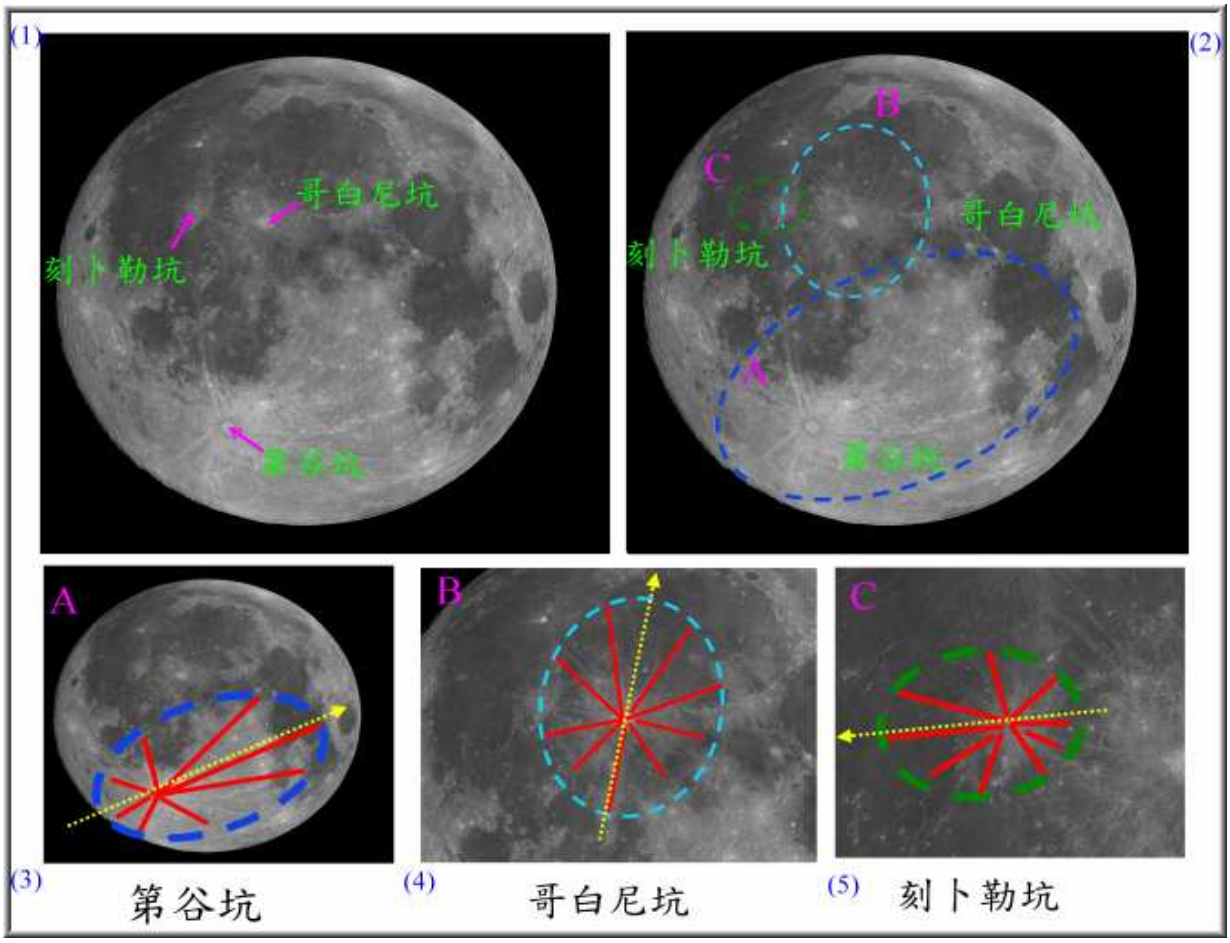
【圖 24】輻射紋「長短軸比值」（A/B 比值）和「射擊角度」的標準曲線。



【上圖實驗條件：伸長量 50cm，射擊角度 10～90 度，直徑 1.5 公分的玻璃珠。其中虛線是線性回歸，方程式為 f (x) = 11.712+（-0.1218）x 】

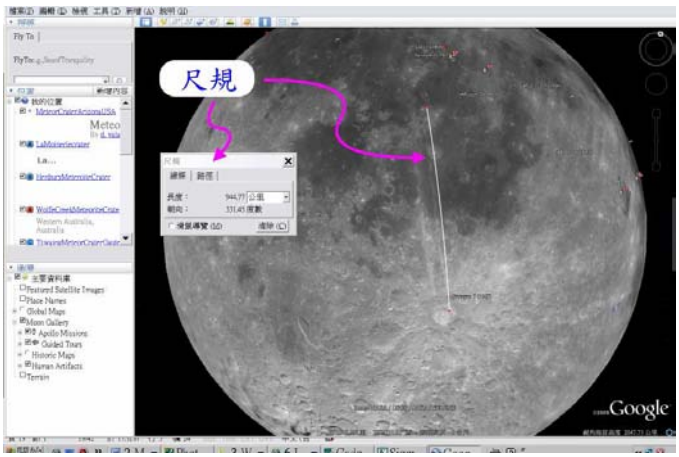
【2. 以「標準曲線」來分析月球隕石坑的「撞擊角度」和「撞擊方向】

【圖 25】分析輻射紋的「長短軸比值」，反推月球隕石坑的「撞擊方向」和「射擊角度」。



【上圖拍攝儀器：vixen 天文望遠鏡+ Nikon coolpix 990】

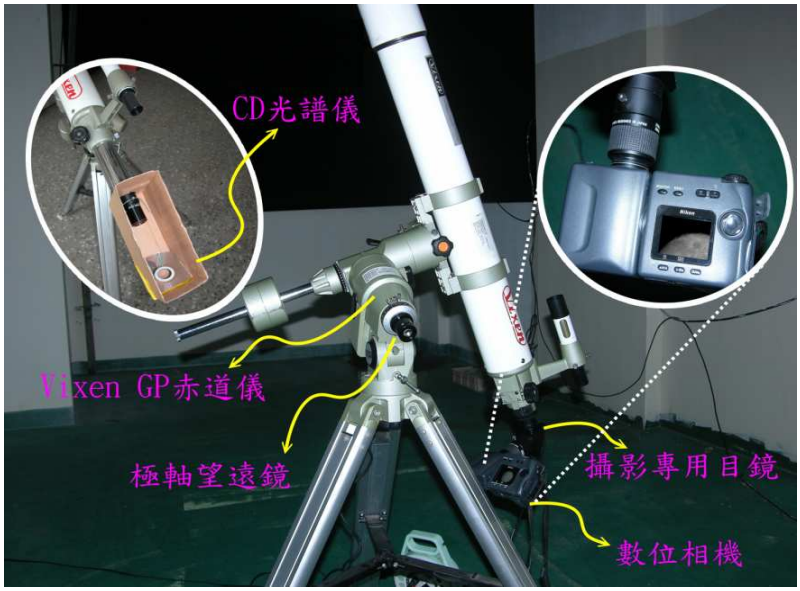
【圖 26】**google** 地球軟體能顯示月球地形，我們利用它的「尺規」功能，測量第谷坑輻射紋的真實長度。「尺規」具有在球形表面測量距離的能力。



【表 2】利用 google 地球的「尺規」測量月球輻射紋的 A/B 比值，將 A/B 比值帶入「標準曲線」的線性回歸方程式，可求得隕石坑的可能「撞擊角度」。四個隕石坑當中以第谷坑的 A/B 比值最大，所以它的射擊角度也最小，約爲 71.6 度。

有輻射紋之隕石坑	A 第谷坑	B 哥白尼坑	C 刻卜勒坑	D 阿里司塔克坑
長軸（A）	1050 km	677 km	470 km	391 km
短軸（B）	351 km	350 km	221 km	215 km
A/B 比值	2.99	1.93	2.12	1.81
※ 求得撞擊角度	71.6度	80.2度	78.7度	81.2度

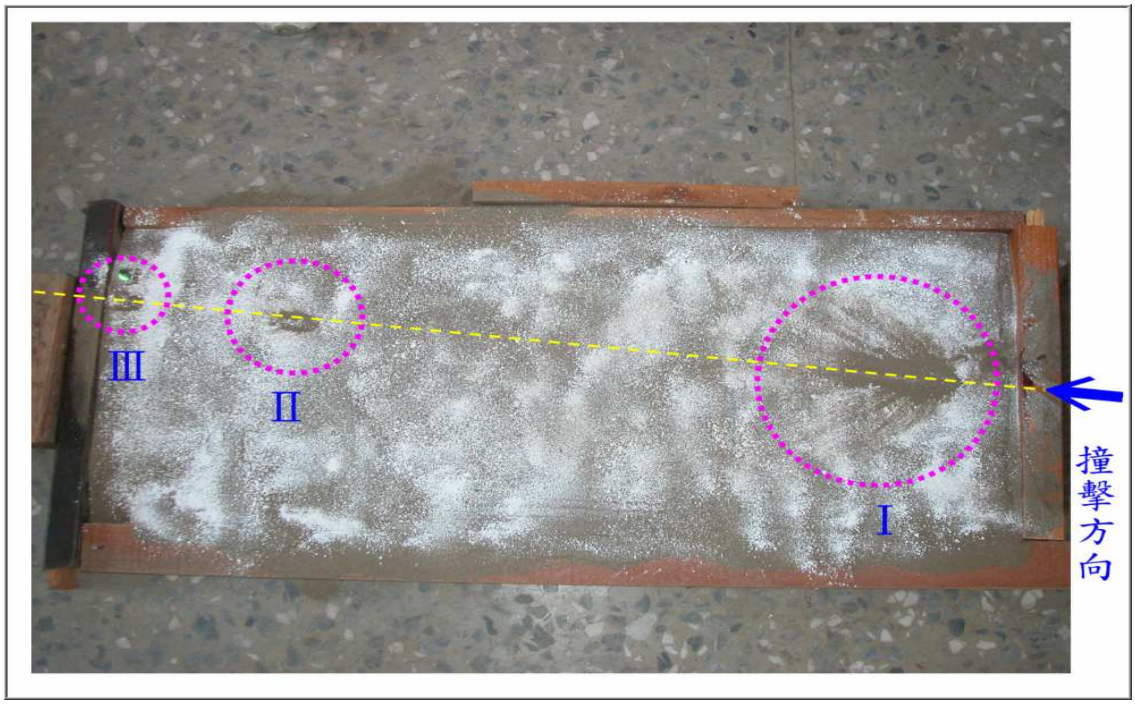
【圖 27】本實驗拍攝月球相片用的天文望遠鏡(含自動導星的赤道儀)和「自製的 CD 光譜儀」



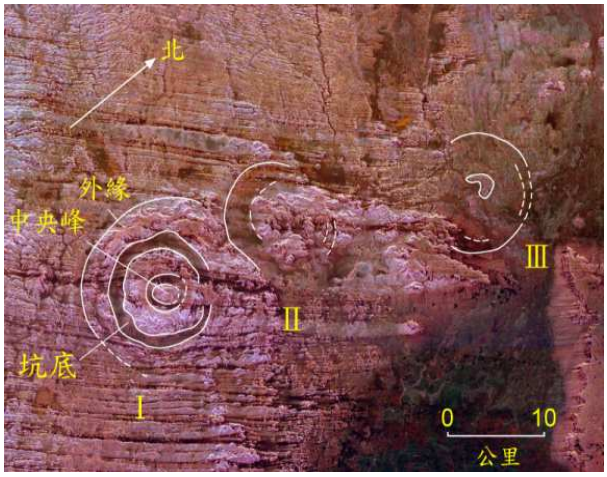
【3.「連續隕石坑」的模擬實驗】

【圖 28】20 度低角度射擊可產生「連續隕石坑」，很類似「打水漂」現象。

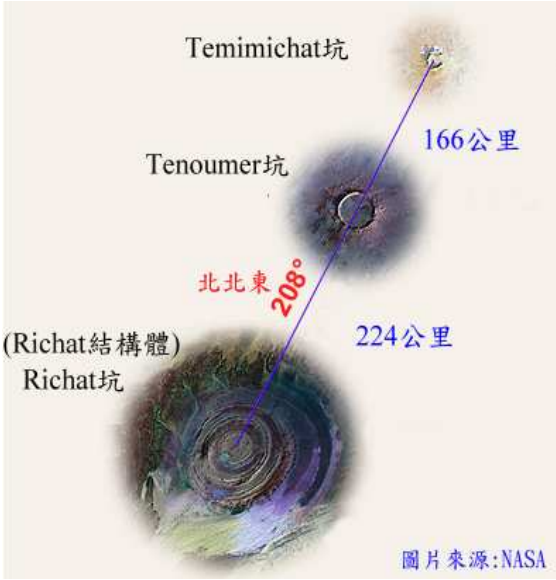
【特徵】（1）三個隕石坑呈一直線。（2）坑的形狀為橢圓形（3）坑的橢圓長軸也和射擊方向一致（4）「輻射紋橢圓形外圍」的長軸和射擊方向一致。



【圖 29】位於非洲中部查德共和國的「Aorounga 隕石坑」的三連坑，被懷疑是地球上極少數的「連續隕石坑」，不過和我們的上圖【圖 28】相對照，可推斷出 Aorounga 隕石坑應該是由不同的隕石所撞擊而成的。



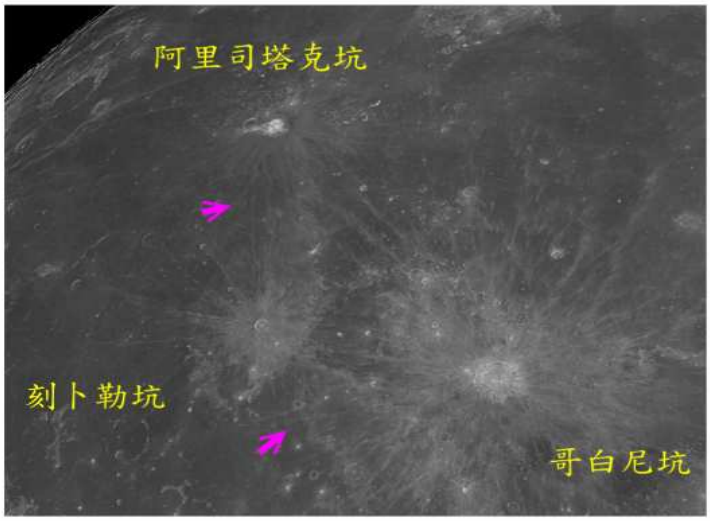
【圖 30】位於非洲 撒哈拉沙漠中的 Richat 結構體的三連坑，它們到底是如何造成的？是由三塊不同的隕石，還是同一塊隕石發生打水漂現象？我們推測本圖並不像【圖 28】的打水漂現象。因爲打水漂是低角度，坑口形狀不應該如此正圓，若是連續隕石坑的話，三者的坑口應該是「橢圓」形而非下圖所呈現的正圓形。



【註：上圖的隕石坑可利用「Google 地球」搜尋得到】

【4. 輻射紋的干擾現象】

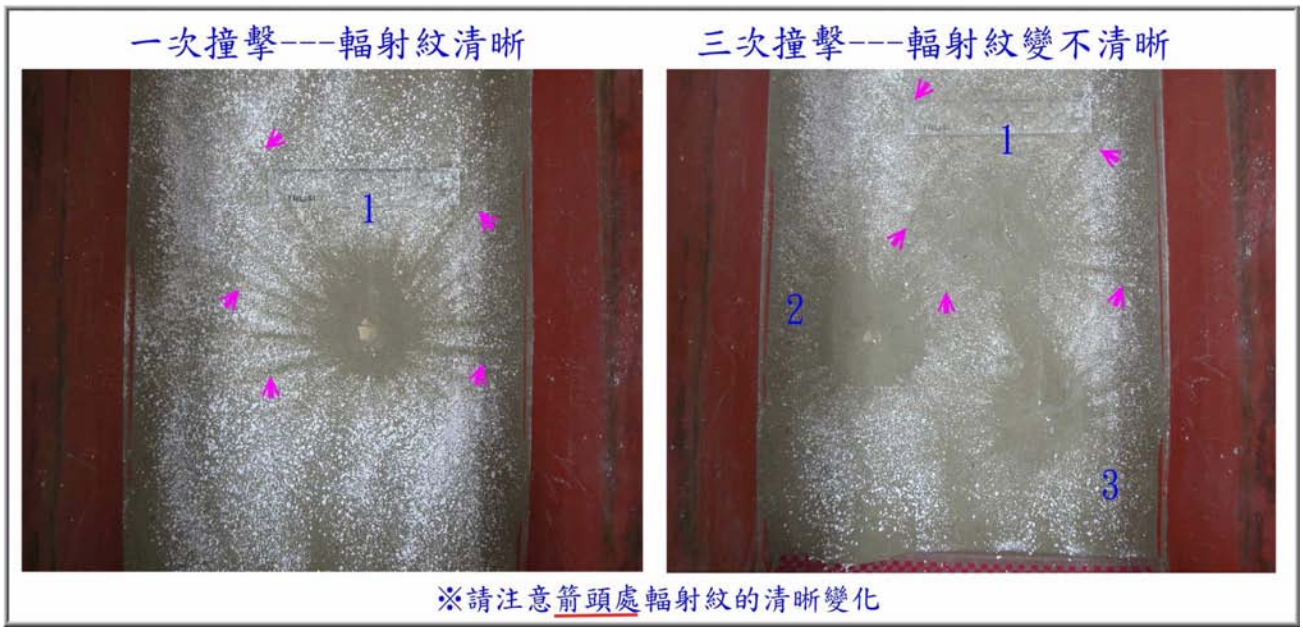
【圖 31】「輻射紋的干擾現象」---由我們拍攝的相片發現在哥白尼坑和刻卜勒坑相交處的輻射紋較爲不清晰，可能具有輻射紋干擾現象。



※箭頭處是輻射紋交錯區，條紋變的較不清楚

【攝影：vixen 天文望遠鏡+ Nikon coolpix 990】

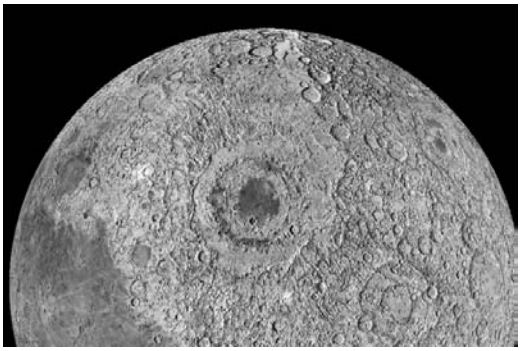
【圖 32】我們對「輻射紋干擾現象」之模擬。我們推測輻射紋之干擾可能原因：條紋重疊、連續撞擊而起月球地表震動或是月球的太空風化現象所造成的。



【研究五】、「多重環形山」產生之原因探討

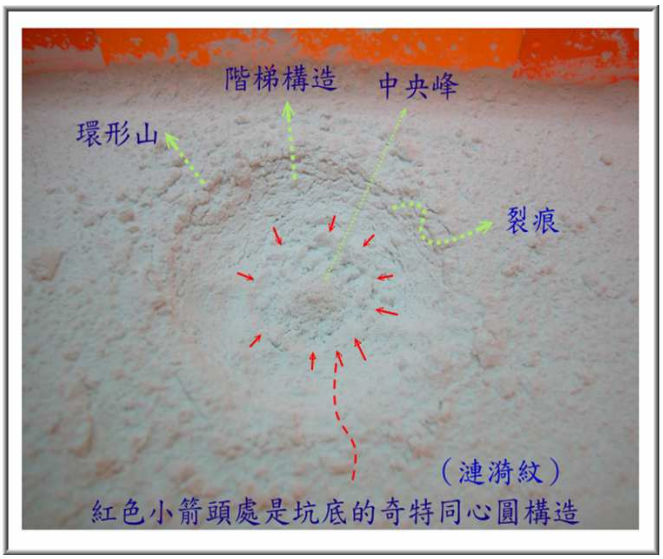
【1. 以「彈力球」撞擊石灰粉模擬「多重環形山」】

【圖 33】月球背面的「東方海」是著名有 3 環的「多重環形山」。中央顏色較深處，是月球內部岩漿流出造成的。



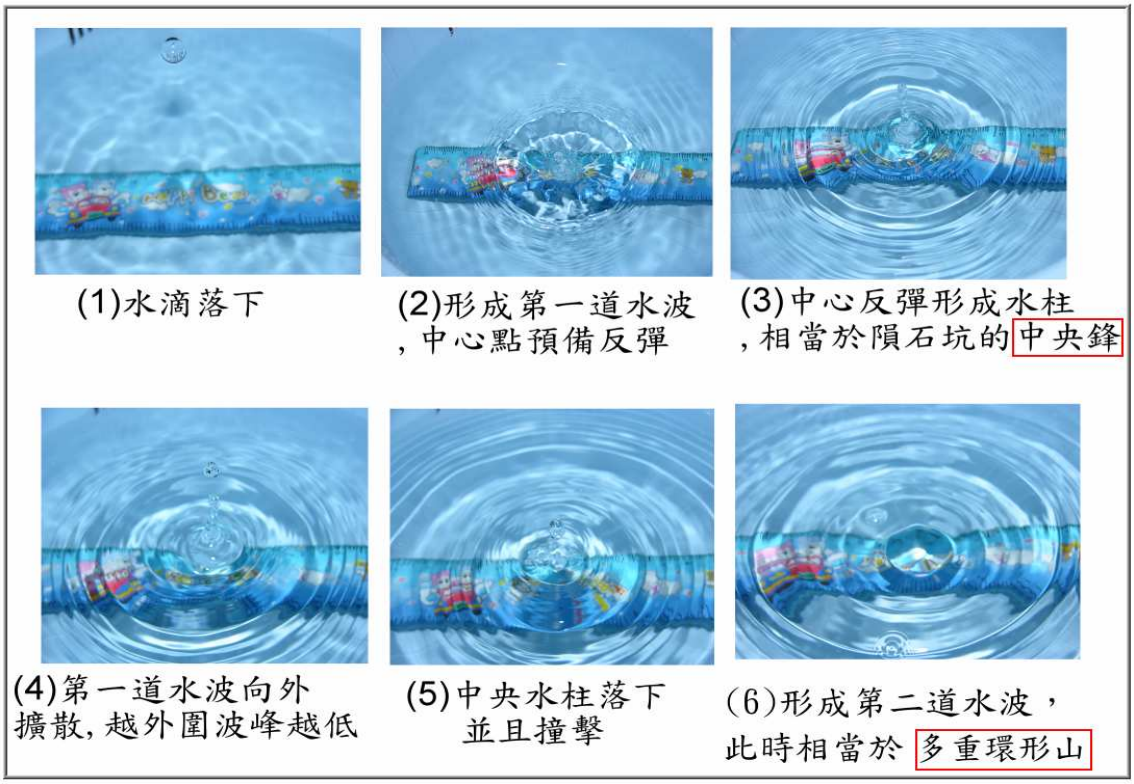
【註：本圖是以 Virtual Moon Atlas Pro 4.0 軟體模擬出月球背面的東方海】

【圖 34】以彈性良好的橡膠彈力球（直徑 4cm）撞擊質地細緻的石灰粉，彈跳後可以產生「多重環形山」。彈力球撞擊的效果比沒彈力的貓眼石好很多。



【2. 水滴滴落過程模擬「多重環形山」之形成】

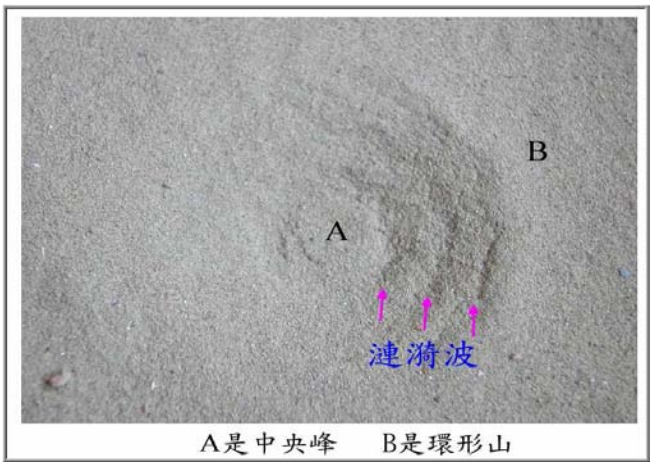
【圖 35】「水滴撞擊過程」瞬間凝結時可以代表「隕石坑形成」時的各種過程。也會具有類似「中央峰」、「多重環形山」的構造。



【註：利用 Nikon coolpix 990 數位相機以兩千分之一秒的快門速度，拍攝水滴落到水盆的一瞬間。這是假設月球受到大型隕石衝擊後地殼發生液化現象。】

【3. 以彈力球撞擊白砂來模擬「多重環形山」】

【圖 36】以橡膠「彈力球」撞擊白砂實驗。在多次實驗後終於以白砂產生很成功的四層的「多重環形山」，可證實不是只有液體才能製造出「多重環形山」。

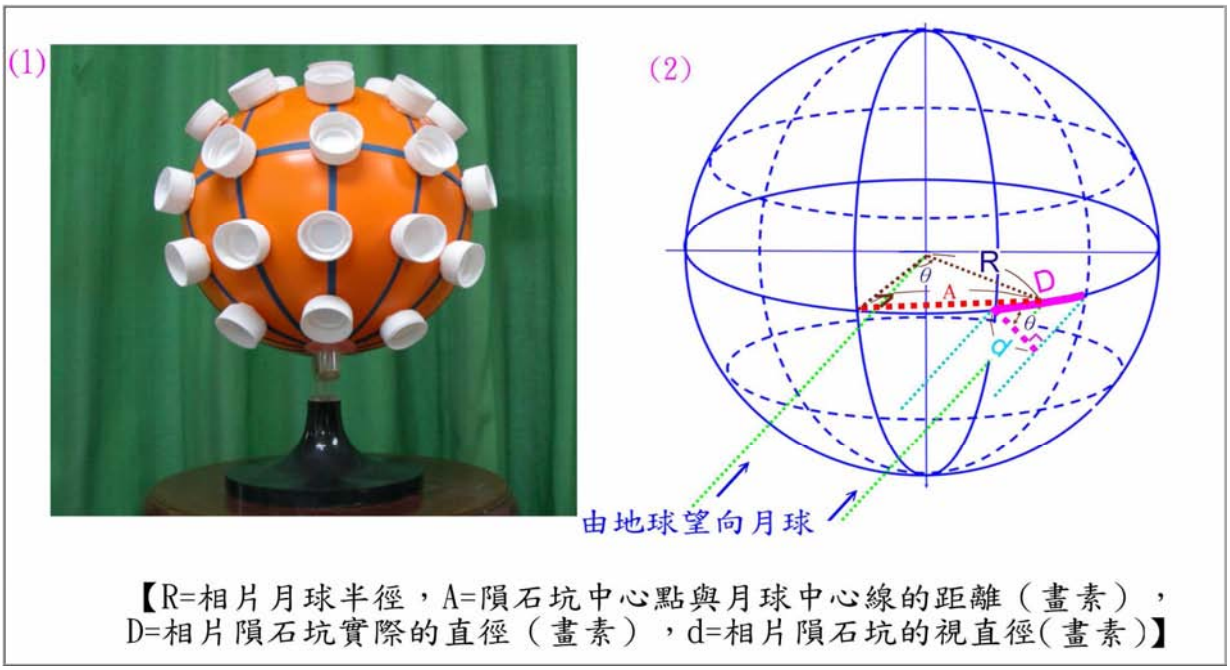


【上圖實驗條件：彈力球直徑 4cm，砂子 1cm，砂子底下墊 0.5cm 厚的合板，以 2 公尺高度自由落體撞擊】

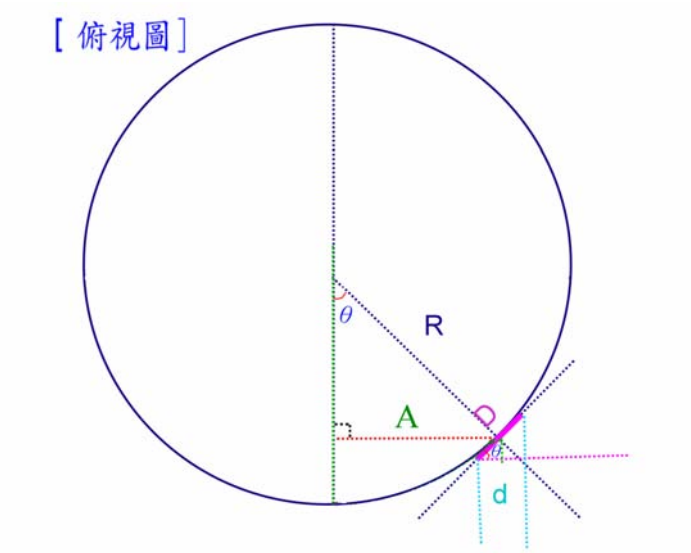
【研究六】、利用月亮相片估算隕石坑寬度

【1. 利用月球相片估算隕石坑的直徑】

【圖 37】自製月球模型幫助瞭解立體概念



【圖 38】以上圖的俯視圖，來求得相片中隕石坑的實際直徑 D（畫素）



$\sin\theta = A/R$；$\cos\theta = d/D$；因為 $\sin\theta^2+\cos\theta^2=1$ 所以 $(A/R)^2+(d/D)^2=1$；

求得隕石坑實際的直徑的畫素： $D = Rd \div (\sqrt{R^2-A^2})$

【例如】：第谷坑—利用我們自己拍的第谷坑相片【圖 15】來驗證
【R= 相片月球半徑 706 畫素， A= 隕石坑中心點與月球中心線的距離 469 畫素，
D = 相片隕石坑實際的直徑（畫素），d=相片隕石坑的視直徑 27 畫素】

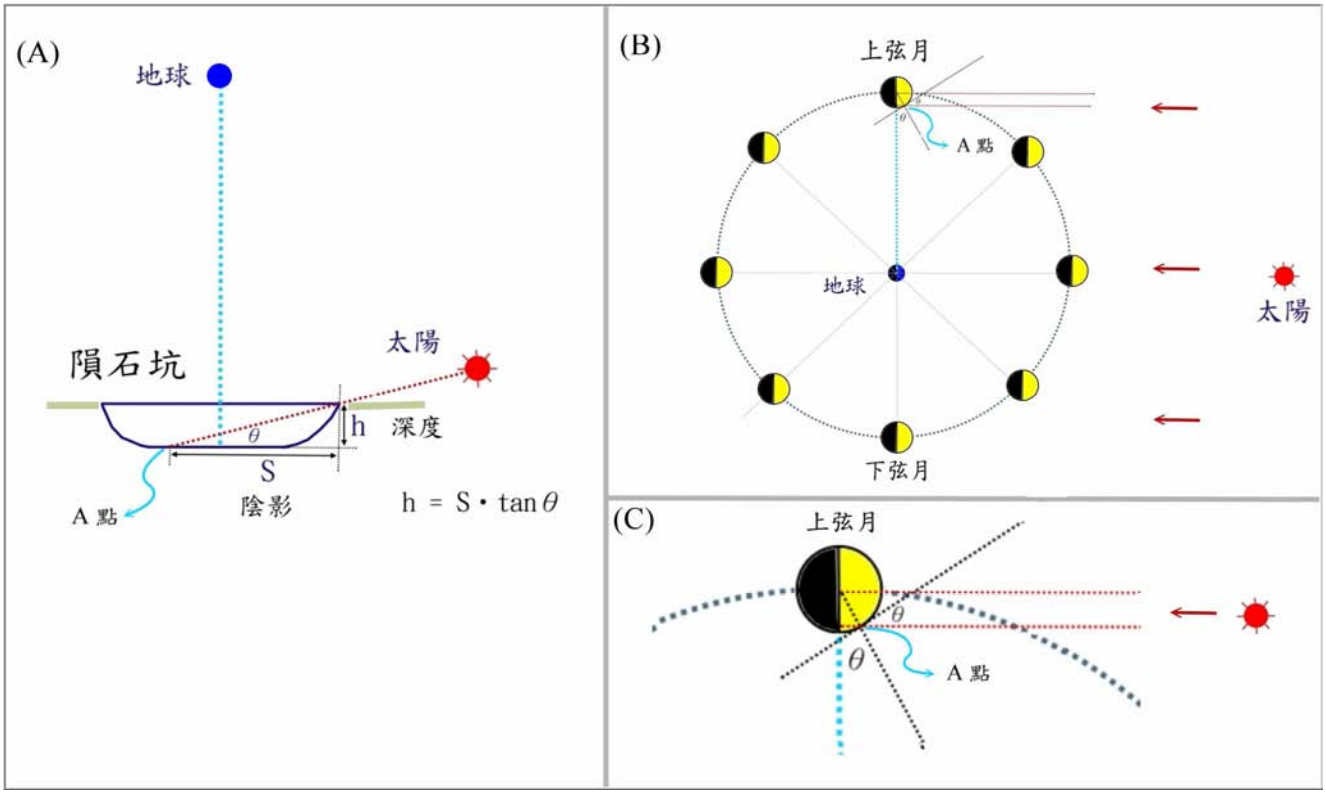
$D = Rd / \sqrt{R^2-A^2} = 706 \times 27/\sqrt{706\times706-469\times469} = 19062/\sqrt{498426-219961}$
$= 19062/\sqrt{278465} = 19062/527.69 = 36.1$ 畫素 ； 所以 D=36.1 畫素

【換算】將「畫素換算爲公里」；
假設 第谷坑直徑爲 x 公里 ； 36.1 畫素:x 公里 = 706 畫素:1737 公里
（其中 1737km 是月球半徑） → 62705= 706x；求得理論值 x=88.8 km；
經查資料實際是第谷坑直徑是 85km 所以很接近實際值

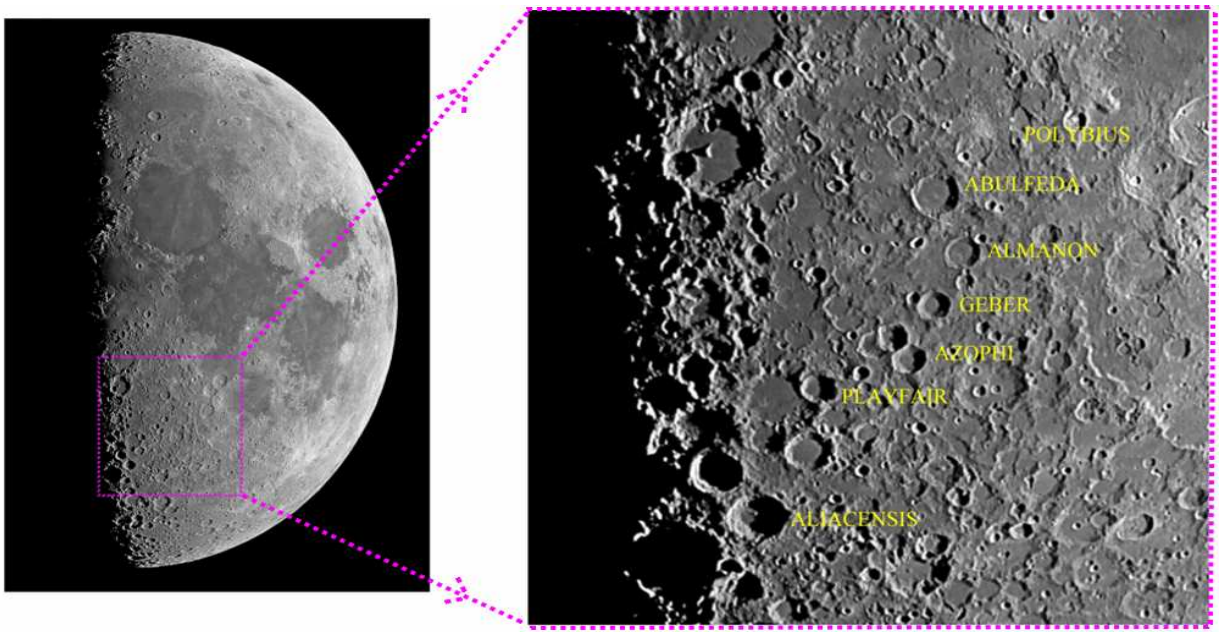
【研究七】、以上弦月相片估算隕石坑深度，並觀察隕石坑陰影變化速率

【1.利用上弦月的相片計算隕石坑的深度】

【圖 39】若太陽和隕石坑的爲夾角（θ），在上弦月（或下弦月）時，隕石坑的「經度」就剛好是此夾角θ值，再利用 h= S・ tanθ公式來求得隕石坑的深度



【圖 40】利用我們拍的上弦月相片來計算本圖中隕石坑的深度



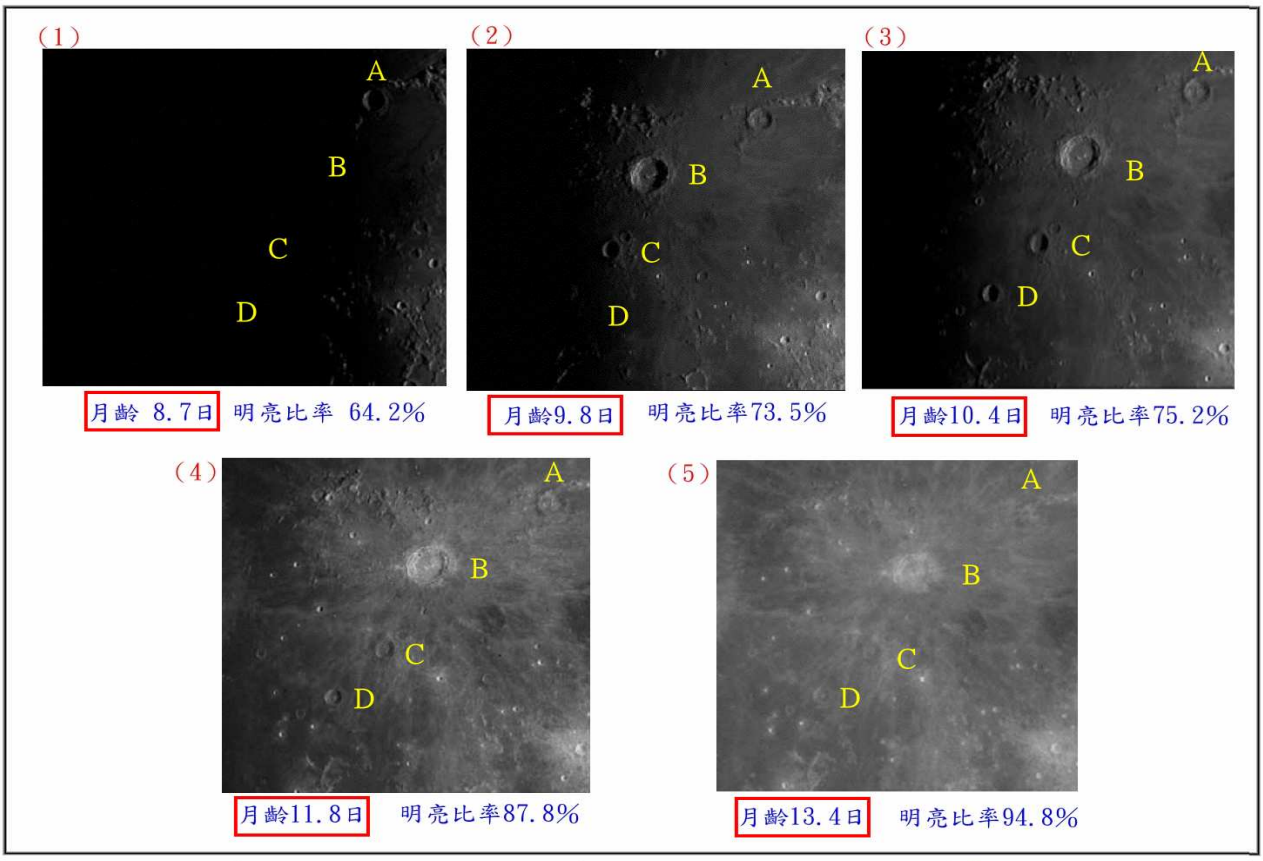
【表 3】以隕石坑的「經度」以及「陰影寬度」來計算隕石坑的深度

隕石坑名稱	實際直徑 (Km)	經度（θ）(東)	S 陰影 (畫素)	直徑（畫素）	tan θ	S 陰影 (km)	h=s*tan θ	h(公尺) 理論值	h(公尺) 實際值	誤差%
ABULFEDA 坑	65	13.9	25	131	0.247	12.40	3.06	3069	3110	-1.29
ALMANON 坑	51	15.2	25	104	0.271	12.25	3.33	3330	2480	34.30
GEBER 坑	46	13.9	32	93	0.247	15.82	3.91	3917	3510	11.59
AZOPHI 坑	49	12.7	33	97	0.225	16.67	3.75	3756	3730	0.71
PLAYFAIR 坑	49	8.4	50	103	0.147	23.78	3.51	3512	2910	20.70
ALIACENSIS 坑	82	5.0	93	166	0.087	45.93	4.01	4019	3700	8.62

（註：隕石坑的實際值讀自Virtual Moon Atlas Pro 4.0軟體）

【2. 隕石坑的「影子變化速率」和隕石坑的深度、寬度有關】

【圖 41】以不同月齡的相片來分析隕石坑影子寬度的變化速率。請注意其中編號 B 爲哥白尼坑的陰影變化，它的陰影變化速率最快

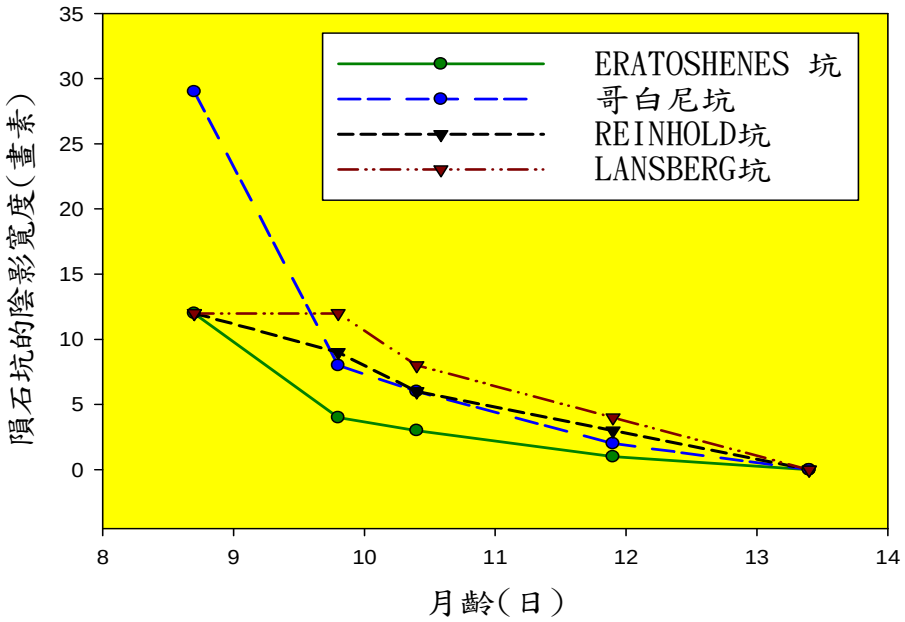


（註：月齡是用星空模擬軟體Starry Night Pro Plus 6 換算得到）

【表 4】分析隕石坑影子寬度的變化速率

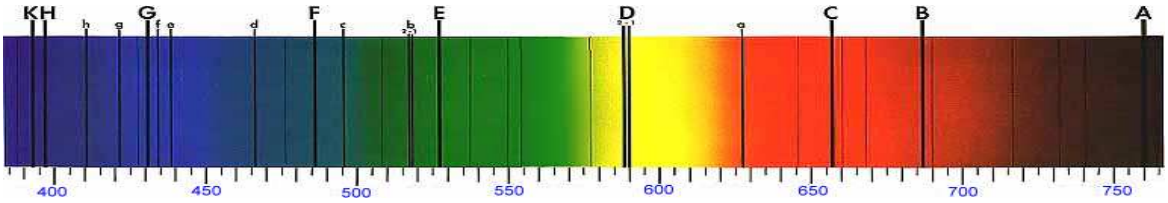
	編號	A	B	C	D
	名稱	ERATOSHENES 坑	哥白尼坑	REINHOLD 坑	LANSBERG 坑
	深度	3570 公尺	3760 公尺	3260 公尺	3110 公尺
	直徑	60 公里	95 公里	49 公里	41 公里
	深度/直徑（比值）	0.0616	0.0404	0.0679	0.0797
隕石坑陰影寬度（畫素）	(月齡 8.7 日)	12 畫素	29 畫素	12 畫素	12 畫素
	(月齡 9.8 日)	4 畫素	8 畫素	9 畫素	12 畫素
	(月齡 10.4 日)	3 畫素	6 畫素	6 畫素	8 畫素
	(月齡 11.9 日)	1 畫素	2 畫素	3 畫素	4 畫素
	(月齡 13.4 日)	0 畫素	0 畫素	0 畫素	0 畫素

【圖 42】以不同月齡的相片來分析隕石坑影子寬度的變化速率(曲線的斜率)，對照【表 4】，可發現編號 B 的哥白尼坑影子的變化速率最大，而它的「深度」和「寬度」也是最大。



【研究八】、隕石坑的光譜之初步分析（CD 光譜儀）

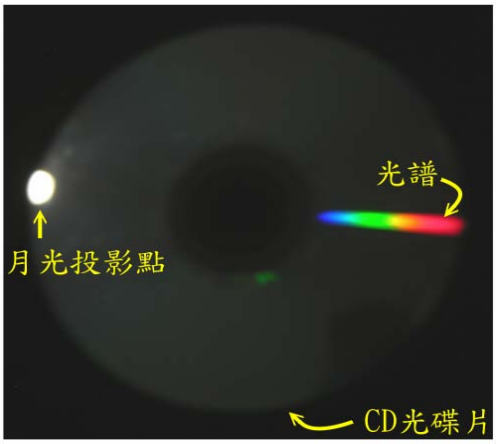
【圖 43】太陽可見光光譜。可見光的波長在 380 到 780 奈米（奈米）



【本圖資料來源：**維基百科**--Fraunhofer 線】

【1. 月球的全景之光譜】

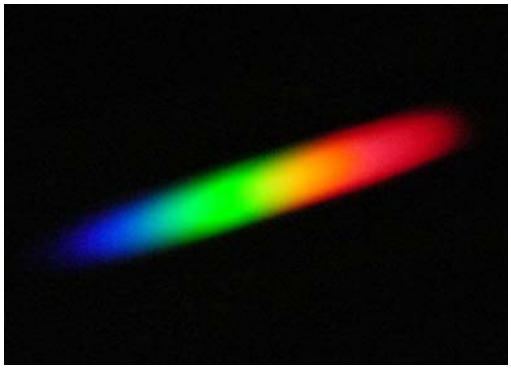
【圖 44】月球的全景之光譜



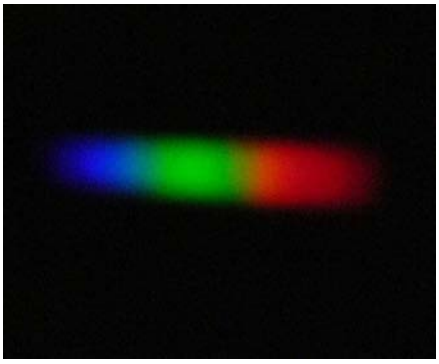
【2. 我們拍的隕石坑的光譜】

【圖 45】以「自製的 CD 光譜儀」拍攝隕石坑的光譜

（1）哥白尼坑



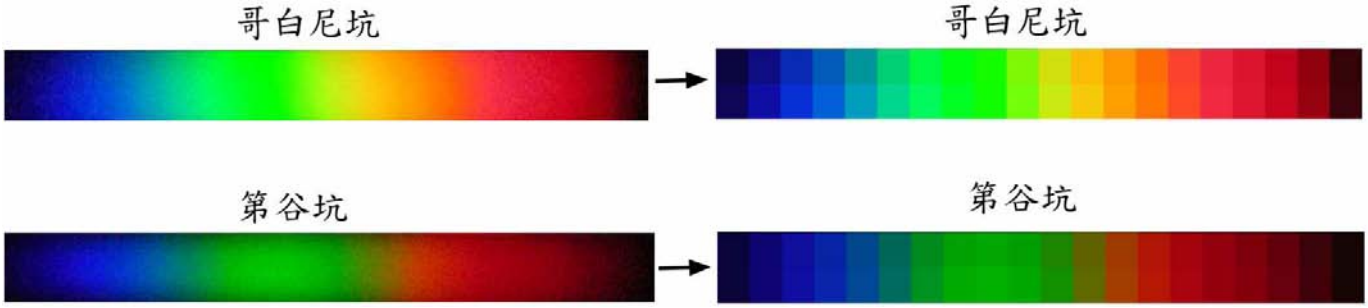
（2）第谷坑



【**上圖拍攝條件**：望遠鏡主鏡焦距 1100mm，口徑 80mm，目鏡 Vixen LVW5mm，放大倍率 220 倍，以 GP 赤道儀自動追蹤拍攝，隕石坑的光線透過主鏡、目鏡投射在 CD 光譜儀之上】

【3. 光譜圖每 40 畫素，馬賽克化】

【圖 46】　先將【圖 45】的光譜圖裁成 800x80 畫素，再每 40 畫素爲一格「馬賽克化」，橫向共 20 格，每格代表 20 奈米波長的可見光，20 格正好代表在 380～780 奈米的可見光。

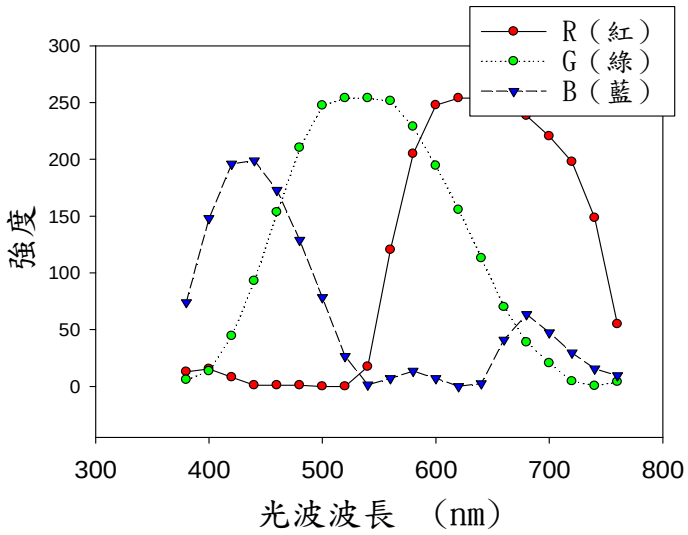


【4. 哥白尼坑的和第谷坑的 RGB 值及 HSB 值之比較】

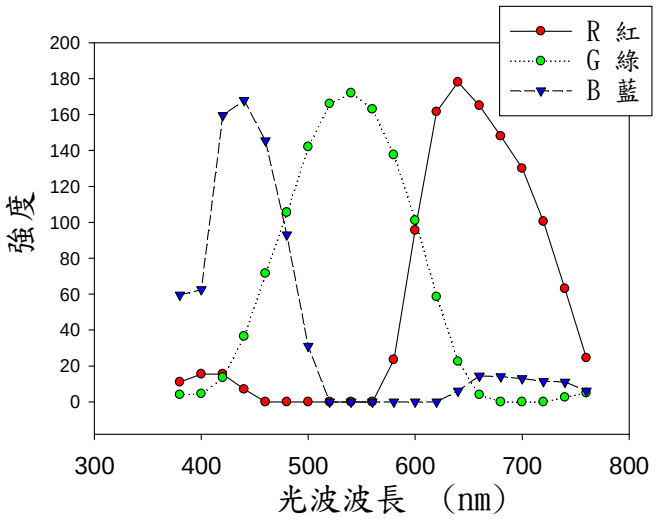
利用影像處理軟體 PhotoImpack 12 的「色彩選擇工具」，可讀出每一個馬賽克小格的「RGB」值和「HSB」值，並將上下兩格數值將加，然後以電腦繪出曲線圖【圖 47】。

【圖 47】隕石坑的 RGB 值比較。可發現哥白尼坑的紅色光譜（R）之區域明顯比第谷坑爲寬（在 550 奈米~760 奈米之間）。哥白尼坑的藍色光譜（B）在 690 奈米附近多了一個小波峰。哥白尼坑位於月球雨海 (古老深色的玄武岩)，而第谷坑位在明亮的高原區，根據【參考資料 6】高能粒子引起的太空風化會影響反射光譜的特徵，會減弱整體的反射率，使光譜曲線變紅，這個現象和我們的實驗結果是一致的。

（1）哥白尼坑的 RGB 值

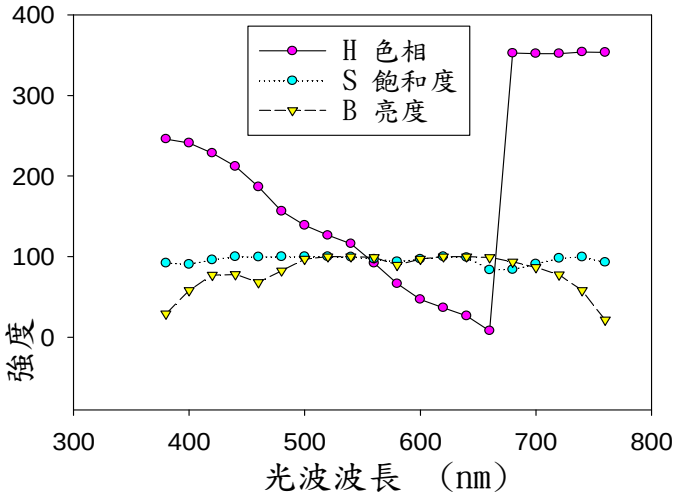


（2）第谷坑的 RGB 值

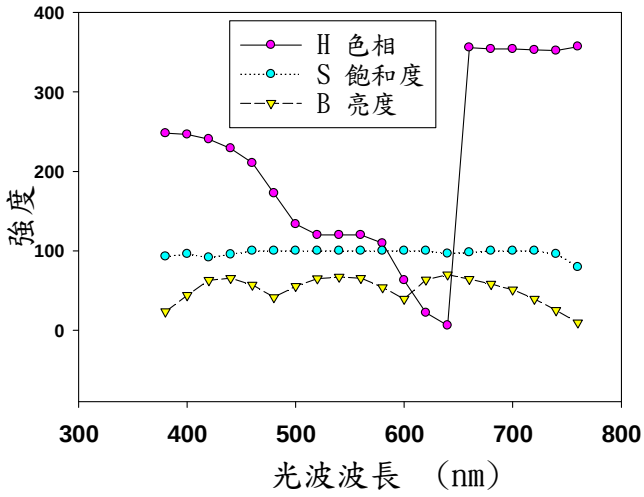


【圖 48】 比較哥白尼坑和第谷坑的 HSB 值，兩者差異不大。但可發現第谷坑 H(色相)在 520～560 奈米之間曲線變化具有平緩的情形。對照【圖 46】也可發現第谷坑在 480 奈米以及 600 奈米二處圖片較暗，所以第谷坑在此波段的亮度（B 值）曲線也有兩個凹處。

（1）哥白尼坑的 HSB 值



（2）第谷坑的 HSB 值



※利用 CD 光譜儀分析出月表之 RGB 以及 HSB 值之變化，此方法所獲得的資訊，會遠多於月亮相片（或肉眼），因爲一般的相機所拍的月球相片僅可判別各區域明暗之差異而已。

※利用 CD 光譜儀甚至可以「鎖定某一波段的可見光」，例如：僅鎖定觀察月表各區的 450 奈米波段之強弱差異，再和已知的岩石標本之反射光譜相互比較，並建立資料庫，本方法再延伸就也許就可以應用來探測月表岩石的組成。

伍、結　論

（1）石灰粉畫的「方格條紋」很方便觀察坑底和表層的地震波之擴散，和受撞擊的受力情形。

（2）紅土球撞擊的過程會碎裂，也會產生漂亮的「輻射紋」、「中央峰」與「環形山」，所以紅土球撞擊實驗是本研究中最好的隕石撞擊模型。若仔細觀察【圖 4】-(3)，會發現中央峰是由灰白色砂子構成，不是由紅土球碎片所構成。可證實中央峰是由「反彈的力道」所構成的。

（3）撞擊力道越大隕石坑的深度會越深，但隕石坑的寬度增加到一個程度後就不再增加，所以具有極大值。鋼珠最大可撞出直徑 9 倍左右的隕石坑。

（4）當彈力位能越大隕石坑的（寬×寬×深）也會越大，證明瞭彈珠的動能越大所撞出的隕石坑之體積也會越大，但曲線上升趨勢是趨緩的。

（5）完整的玻璃彈孔，它具有「同心圓構造」很類似「梯田隕石坑壁」【圖 17】。由玻璃彈孔的「橢圓形延伸碎裂區」軸的方向和「最大破裂痕方向」都會和「射擊方向」一致，這和砂坑實驗【圖 23】結果很類似。

（6）建立輻射紋之「長短軸比值」和「射擊角度」之間的「標準曲線」。藉此可以反推出第谷坑、哥白尼坑和刻卜勒坑阿里司塔克坑的理論撞擊角度分別約爲 71.6 度、80.2 度、78.7 度和 81.2 度。

（7）我們模擬出很棒的「連續隕石坑」(20 度低角度射擊)，這是由單一隕石的「打水漂現象」。本實驗產生的連續隕石坑具有下列 3 個特徵：(1) 隕石坑三者呈一直線。(2) 隕石坑本身的形狀爲橢圓形，坑的長軸方向和射擊方向會一致。(3)「輻射紋橢圓形外圍」的長軸的方向也是和射擊方向一致。

（8）由我們對輻射紋的干擾現象之模擬，推測「輻射紋之干擾」原因可能是：條紋重疊、後續撞擊之震動或是月球的太空風化現象所造成的。

（9）水滴撞擊水面的實驗，可以代表隕石在撞擊過程所發生的各種連續現象。也會具有類似中央峰與多重環形山的構造。

（10）以彈力球撞擊石灰粉，彈力球跳離時很容易產生「多重環形山」、「中央峰」與「梯田隕石坑壁」等地形。

（11）我們利用白砂子和石灰粉都可以成功產生「多重環形山」，證實「不一定只有液體」才能製造出「多重環形山」

（12）由【圖 39】，若能得知太陽和隕石坑的夾角（θ），就可利用 $h = S \cdot \tan\theta$ 公式求得隕石坑的深度，而當上弦月（或下弦月）時隕石坑的經度就剛好是太陽和隕石坑的夾角（θ），所以可以利用上弦月相片的經度來求得隕石坑的深度。

（13）【圖 41】由我們所拍的相片來分析隕石坑的影子變化（畫素），發現哥白尼坑的曲線斜率變化最大【圖 42】，對照【表 4】發現它的深度和寬度也是最大。

（14）我們將哥白尼坑和第谷坑拍攝的光譜圖裁成 800x80 畫素，然後以影像處理軟體 PhotoImpack 12 處理，每 40x40 畫素「馬賽克化」，橫向共二十格，每格代表 20 奈米的可見光波長，正好代表可見光的波長在 380 到 780 奈米。

（15）要瞭解月表隕石坑的成分差異，若以望遠鏡觀察除了明暗是看不出有何差異，但透過「自製的 CD 光譜儀」就可以看出「反射光譜」有些微的差異。而且可以鎖定只觀察某一波長的光在月表各區域的變化情形，這是很有創意的觀察方法。

（16）比較哥白尼坑和第谷坑的 RGB 值【圖 47】可發現，哥白尼坑的綠光和紅光的比率比第谷坑的綠光和紅光的比率為強。

（17）根據【參考資料 6】太空風化會影響反射光譜的特徵，會減弱整體的反射率，使光譜曲線變紅，即是紅化現象（反射率隨著波長增長而增加），這個現象和我們的實驗結果是一致的。

（18）我們只所能模擬月球上隕石撞擊過程的部分現象，其中有太多的變因是無法在我們學校的實驗室模擬出來的。

陸、參考資料

1. 王致勻等。民國 89 年。外太空來的腳印—探討隕石撞擊的現象。全國科展第四十屆科展國小組優勝作品專輯 http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/40/40.htm
2. 2008 TC3 小行星。維基百科，自由的百科全書 http://zh.wikipedia.org/
3. Shoemaker-Levy 9 彗星，維基百科，自由的百科全書 http://zh.wikipedia.org/
4. 巴林傑隕石坑（Barringer Crater），維基百科，自由的百科全書 http://zh.wikipedia.org/
5. 朱曉瑾。民國 93 年。用光盤自製光譜儀。 http://www-2.cs.cmu.edu/~zhuxj/astro/cn/html/spectrometer.html
6. 胥濤。民國 93 年。利用反射光譜和熱輻射探測月球表面物質的理論和方法（論文摘要）。 http://edu.nulog.cn/detail.htm?79534
7. 隕石坑。 維基百科，自由的百科全書 http://zh.wikipedia.org/
8. 太空風化。 維基百科，自由的百科全書 http://zh.wikipedia.org/

【評語】080502

隕石坑與輻射紋的實驗設計簡易可行又有趣，但有關研究過程和方法六、七、八的部分，可以更深入的強化它的意義。