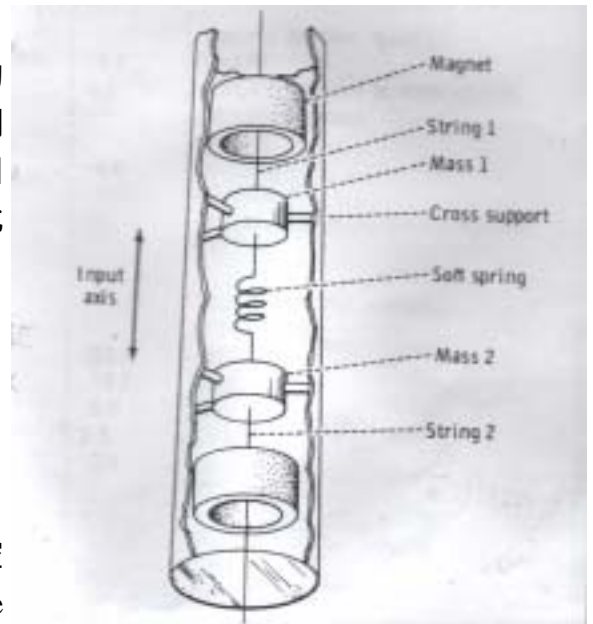


阿波羅 17 月球重力測量

於 1973 年的阿波羅遣隊，在月球這一個天體上，使用重力測量方法，其明顯的目的，在於接受地球以外，重力測量的挑戰任務。另外特殊目的，是瞭解地球與月球之間引力束縛關係，並調查研究阿波羅 17 登陸地—金牛座(Taurus-Littrow)凹壑區的地質結構。金牛座凹壑區，位於南北兩大山塊之間，此區山谷擁有的特質將會被測量。

美國國家航空暨太空總署(NASA)組成一組實驗隊，我是擔任研究橫貫重力實驗(TGE)的主要調查員，這科學組織隊其他成員，為史丹佛大學的喬治·湯瑪生、布萊恩·丹、漢滋·格特卡歐在蘇黎士 ETH 及在麻省理工學院實驗室的謝爾登·別克。在月球上的測量，交由阿波羅 17 上兩位太空人：俊·塞曼(Gene Cernan)及捷克·遜爾特(Jack Schmitt)；第三位太空人，為在這次太空旅途中，停留在太空船中的李·亞爾巴(Lee Evans)。這些太空人的角色，於這次實驗似乎無明顯重要，但他們勤奮、熱情地完成測量是絕對重要關鍵。



(圖 1) 概要顯示 Bosch-Arma 雙弦震動加速器

這份報告大部份是根據湯汪民及其他人報告(1973 年)，也是美國國家航空暨太空總署(NASA)初步報告的一部份 13-1----13-13, 1973。以下縮寫文字用常於本篇文章：ALSEP：阿波羅月球表面實驗封裝體；EVA：艙外活動；LM：登月艙(登月小艇)；LRV：登月漫遊車；SEP：表面電性器材封裝體；TGE：橫貫重力實驗；VSA：彈弦震動實驗。

測量儀 使用於橫貫重力實驗中的 Bosch-Arma 彈弦震動實驗，是利用雙弦儀器(圖 1)，當感應器處於正常垂直位置上，介於兩弦線間不同頻率 f_n ，會被得到以下列公式：

$$f_n = k_0 + k_1g + k_2g^2 + k_3g^3 + \dots \dots \dots (1)$$

使用雙弦儀而不用單弦儀的理由，是簡化高階項的係數值，且引起震動相關聯的加速度，將無法於偶數項上作線性修正，而從測得重力引力值上去分析，是很困難的，當在派遣之前常數 k_0 、 k_1 、 k_2 與 k_3 已都被測量出， k_0 值能數值轉變，在計算任何轉變值中， k_0 值的獨特測量方式，是在反轉模式下，利用反轉感應器和記錄頻率來獲得數值：

$$f_i = -k_0 + k_1g - k_2g^2 + k_3g^3 + \dots \dots \dots (2)$$

利用 f_n 減去 f_i ，假設 k_2 值不能轉移， k_0 值就能計算出。利用各個 VSA 中頻率介於 9.25~9.75KHz 的弦線，其輸出頻率的實際值在不同頻率下，標準與反向位置分別為 28 與 14Hz；月球重力值約為 163000mGal。

測量準確度要求在 0.1mGal 以來，VSA 量得的不同頻率，必須測量到百萬之一。不同頻率週期的簡單計算，不可能花長時間去算。利用不同頻率 f_n ，產生經過 1536 個循環來克服這個困難，利用準確度 125~Hz 的鐘，在正常情況下，1536 個循環的大小(共計約 55 秒)，去計時震動，可即時量出在反向模式下，使用循環須以 384 循環 f_i (幾乎為 27 秒)來做；測量精準的週期數，大概分別為 6.9 百萬與 3.4 百萬，如此小於 1 分鐘的測量法，是必需精準達到。

我們注意到在與地球重力不同的地方，使用弦震動測量儀器比彈簧測量儀明顯可行，彈簧測量儀的

基本構造在阿波羅 17 的旅途中，無法運用於表面重力實驗。

Table 1. Traverse gravimeter (TGE) readings

Location	Elapsed time	g	Elevation	Free air anomaly	Bouguer anomaly	Comments
EVA-1						
1. LM site						Thermal monitor reading
2. LM site	1:17:32	-1.4	4510	-1.4	-1.4	On LRV
3. LM site	1:40:32	0.0	4510	0.0	0.0	Off LRV; adopted as base reading
4. LM site	1:44:29					Off LRV; inverted
5. ALSEP site	2:15:16	-1.3	4510			On LRV
6. Station 1	5:08:03	-4.6	4510	-4.6	-4.6	On LRV
7. SEP site	5:56:03	-3.7	4510			On LRV
8. LM site	6:39:44					Off LRV; disturbed and disregarded
9. LM site	6:55:42	-1.4	4510			Off LRV
EVA-2						
10. LM site						Thermal monitor reading
11. LM site	0:17:46	-0.2	4150			Off LRV
12. Station 2	2:18:05	-50.8	4625	-27.5	-23.5	On LRV
13. Station 2A	3:21:09	-40.5	4605	-22.4	-19.5	On LRV
14. Station 3	4:02:40	-16.5	4565	-5.0	-5.0	On LRV
15. Station 4	4:56:12	-4.5	4543	4.2	2.5	On LRV
16. Station 5	6:00:11	-10.6	4525	-1.5	-2.8	On LRV
17. LM site		-2.0	4510			Off LRV
EVA-3						
18. LM site						Thermal monitor reading
19. LM site	0:17:20	-3.2	4510			Off LRV
20. Station 6	1:29:00	-36.0	4575	-24.4		On LRV
21. Station 8	3:20:xx	-31.6	4575	-20.0	-22.6	On LRV
22. Station 8	3:45:39	-32.5	4575	-20.9	-23.5	Off LRV
23. Station 9	4:30:46	-12.7	4515	-10.5	-11.2	On LRV
24. Station 9		-12.9	4515	-10.7	-11.4	Off LRV
25. LM site	5:55:58	2.1	4510			Off LRV
26. LM site	6:03:00					Off LRV; inverted

溫度監控 因為月球無大氣的情況下，從有陽光到陰暗處，其間溫度變化極大，所以，準確成功地監控溫度感應器是非常重要的，因為 VSA 感應器，易受溫度的變化影響，而 VSA 被裝於精密地利用均衡比例控制運轉電熱器的爐箱中，以保持在固定溫度 322K，不超過 0.01。電阻溫度計是監控項目之一，精密的爐箱被包裝於一個外爐，使熱量保溫整個儀器，儀器上方有一散熱器來調節溫度，在 TGE 上有兩個數字顯示器，顯示兩個爐箱溫度。

當太空人進行艙外活動時(在獲得重力讀數後)，散熱器向左關掉；儀器利用電能所產生之熱度，來減少爐箱熱度變化，在艙外活動中，儀器被放於陰暗處，散熱器打開，並將熱氣排出太空中。

水平校正 為了測量重力 - 橫貫重力儀，須平放不超過 3arc 秒，以致偏離水平不多於 0.06mGals，其目的是防止任何誤差產生，儀器被平穩擺放於，利用兩個垂直擺錘所做成的平衡座上，比較測定機以繞行的方式，測出擺錘的垂直偏向，並以此資訊來做為旋轉動力的條件，通常轉動平衡座直到擺錘垂直為止；旋轉動力有兩種方式，當擺錘偏離垂直向超過 32arc 秒時，旋轉動力變快，當在 32arc 秒之內，其旋轉動力變慢，以避免超過。另一套相似的擺錘，在反向顛倒模式下，一向平行於橫貫重力實驗，水平校正的時間標準為 0~20 秒，在反向模式時間為 90~130 秒，假如儀器能始放於遠離小於 15 度的水平表面上，水平校正就能順利達到完成。

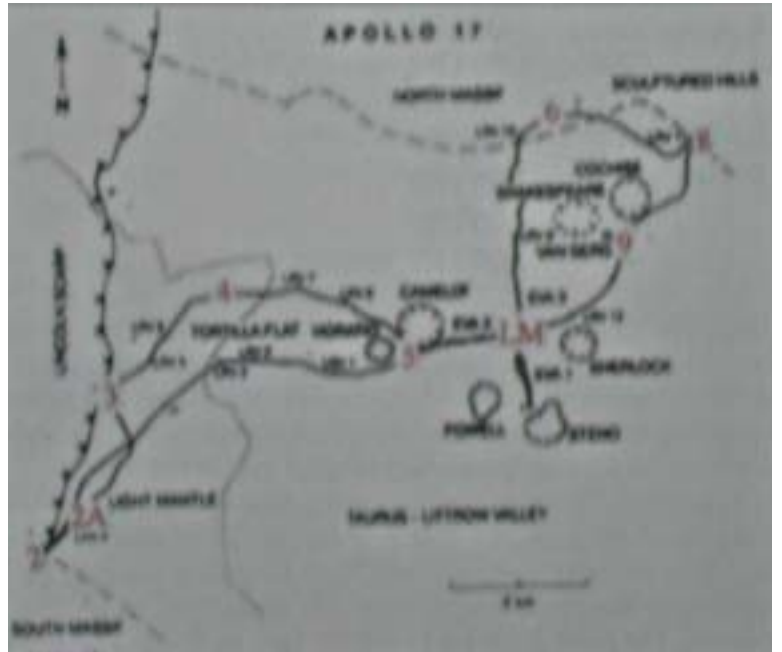
TGA 外面結構物質描述 橫貫重力儀外圍結構，為一個平坦底部圓柱狀體，儀器頂部有一攜帶用及不使用時鎖住骨架的摺疊式手把，儀器利用底部有三個支腳來平放於月球表面上，可開可關的散熱器位於頂部，頂部也有九個數字的顯示儀表，前 7 個數字是提供重力值，讀數 8 與讀數 9 是提供溫度計

值，熱量保溫層提供絕緣隔熱並包圍整個儀器，散熱器及顯示儀表被安裝絕緣絕熱套。

作業 攜帶重力測量 TGE，擺放於水平不超過 15 度的表面上，在儀器尚未正常運作時，三分鐘時間是為了考慮到完整的讀數，除非按了獲得讀數的按鈕。GRAV、READ、BIAS 三個按鈕，位於儀器的頂部，標準讀數需由按 GRAV 鈕開始，週期測量從儀器水平校正開始，閃光燈會亮起顯示，當儀器於垂直面不超過 3arc 秒時，閃光燈會不閃爍。不同弦頻率測量開始運作，在這頻率測量期間，燈會持續亮著，當燈消失後，重力讀數可於顯示器前七數字鍵讀取，顯示器會停留二十秒，之後須按 READ 鈕打開顯示器，按 BIAS 鈕，則以相似的測量方式，測量反向位置的重力讀數。



(圖 2) 太空人與 TGE，月表不是藍色的，但 TGE 藍色的。



(圖 3) 阿波羅 17 在金牛座高地上，EVAS 及重力站之位置(紅色)，測站 1 為 SEP 及 ALSEP 到登月艙關閉處，它們未個別顯示。

測量 在艙外活動期間，太空人攜帶橫貫重力儀在登月漫遊車上，此時，有一個問題浮現，在漫遊車(Rover)上作橫貫重力實驗時，重力讀數是否可獲得？是否每次測量橫貫重力實驗，就必須放在月球表面上？在漫遊車上測量讀數，對於太空人來說，是非常方便，因為他們不須要搬運橫貫重力儀到很遠的地方，才彎腰放下。(圖 2) 另一方面則是 Rover 這設備對振動很敏感。在相同的位置走進及離開 Rover 時，讀數會在 4.6- 6.9 mGal 之間，由於對這一差別的原因不清楚，但是，-6.0 mGal 是為在漫遊車(on-Rover)上所修正的經驗值範圍。對於從急任務(postmission)的測試與剩下的飛行模式均適用這些修正值。當重力儀的手把不協調時，重力儀讀數被暫時性的轉換，以確定指令，雖然這轉換少於 6 mGal 經驗值。

重力儀漂移 是在橫貫重力儀移動七小時週期的任務前被決定，它與每一個 EVA 的持續時間是一致的，重力儀要漂移，基本上为零。為了估算它在月亮上的漂動，在登月艙上做了幾個讀數，另外讀到一個因為 TGE 支腳撞擊的錯誤數值，與第一讀數相較而論，其後所有讀數都呈負值(到達 -3.2 mGal)。但是，因為沒註記任何可辯明的漂移模式，並沒有採用任何一個漂流數值。

測量和修正值 在月表上總計製造了二十六個讀數(圖 3)。在艙外活動前有三個讀數(1,10,和 18)用於學習這設備的熱狀態，我們不能從這三個讀數中得到重力值。

建構 TGE 的電子階段鎖警報，如果在閱讀期間干擾這個設備，在顯示開始的三個數字應為零，如此是讀數 8 的情況，因此，被放棄了。

有九個讀數是在這登月艙產生的，有六個讀數 (3,9,11,17,19,和 25) 為 TGE 在月球表面的垂直位置上測得。在每個艙外活動的前端及末端各產生了一個讀數，兩個讀數 (4 和 26) 是決定 k_0 在開始及結束間測量的偏差值。讀數 2 在 LRV 產生，並比較 "on LRV" 及 "off LRV" 的測量值，類似的比較在出現在測站 8(讀數 22) 及測站 9(讀數 24) 中。除了 LM 的讀數以外，在不同地點(讀數 5,6,7,12,13,14,和 23) 出現了 11 個其他的讀數，它也應該注意測站 1，即 SEP 及 ALSEP 在登月艙間彼此很密切。

讀數 3 中 "off LRV" 在登月艙是被接受的，它是為基本值 g ，並且獲得了在其他測站取得的相關值。計算獲得了 $k_1=0.0001318 \text{ Hz/mGal}$ 的值，並且忽略 k_2 和 k_3 ，因為其重力值 g 很小。

在登月艙座落處選定基準高度，這測站(station)的海拔高度是所有測站中最低的，為了計算自由空間 (free-air)修正，使用了 $2gm/r$ 公式，其中 gm 是在月亮上的重力； r 是月球的半徑。這值近似 0.19 mGal/m ，河谷平原(valley floor)座落在登月艙正下方，而南北中央脊(massifs) 座落於登月艙兩邊。對於河谷平原和兩個中央脊作布蓋(Bouguer)修正計算。以下的內容解釋密度的選擇，Table I 是提供高度及重力的資料。

密度的選擇 由兩種方法可以決定月球樣品密度的實際值。第一種，做一個鋁箔大小的容積，或精確挑選樣品並透過測量它們的線性尺度，決定樣品的體積挫敗模型，對於一些小樣品的密度值使用阿基米德原理直接測量。角礫岩樣品的密度通常在 $2.3 - 3.0 \text{ gm/cc}$ ；馬(Mare)玄武岩樣品是 $2.8 - 3.4 \text{ gm/cc}$ 。多孔性的值被少數樣品所決定的，也產生以多孔性為主的密度圖，同時，樣品的內在密度也被定義，這三個玄武岩的值是 $3.25 - 3.49 \text{ gm/cc}$ ；角礫岩樣品的值是 $2.99 - 3.14 \text{ gm/cc}$ 。

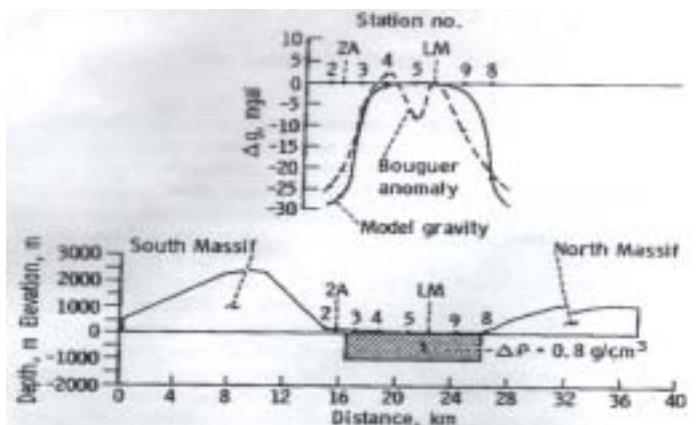
第二種是把密度作為計算布蓋修正之用。北中央脊和南中央脊的地塊，是同月球高地的一部分，由高度碎裂的岩石和角礫岩構成，另外一項假設：河谷平原由馬玄武岩所沈澱組成的。對於高地的物質，認為過去所收集的角礫岩樣品是這些地塊中物質密度的代表。對於河谷平原的物質，認為比內在密度為小的月玄武岩所組成；對於高地物質密度顯示可能因為滲透性有極大的範圍。

因此相信，形成厚的玄武岩和高地角礫岩物質之間的密度比應該至少為 $3.2 - 2.8 = 0.4 \text{ gm/cc}$ ，最多為 $3.3 - 2.3 = 1 \text{ gm/cc}$ 。為了此山谷中玄武岩厚度的計算，我們採用的密度比為 0.8 gm/cc 。

建構模型 採用 Table I 中的布蓋異常值來構造一個簡單架構模型，假定二維計算的布蓋異常及取得的架構模型，在由玄武岩組成的次河谷平原及角礫岩化的高地物質採用了 0.8 gm/cc 的密度比，使用這個密度比，可假設河谷平原下躺著 1 km 厚的玄武岩物質。(如圖 4)

較大的布蓋梯度在陡峭的河谷側面是假設含玄武岩物質的物體，此物體在南側河谷內部達 1 km ，在北方已經進行了類似觀察，如果模型輕微地改變以更適合此布蓋曲線。

地球-月亮重力繫 正常的讀數 3 和經轉換過的讀數 4 在金牛座(Taurus-Littrow)谷與在登月艙獲得 k_0 的值为 7.21591 Hz 。實驗室測驗的預估值是 7.2144 Hz ，期間的轉變量是 0.0015 Hz 與大約 11 mGal



(圖 4) 假設模型的次河谷密度可解釋這布蓋異常，高度及深度參考基準高度(0m)，此為LM所在地，陰影矩形部份代表在河谷內玄武岩物質之假設體及角礫岩化的高地物質，是實際的密度比

的偏差轉變。在振動和讀取期間與偏差的轉變作比較時較為合理。常數 k_1 ; k_2 和 k_3 是在起飛前測驗期間獲得的，對於上面所述金牛座(Taurus-Littrow)地點產生 162694.6 mGal 的值是為一個常數值。

正常的讀數 25 (基礎方面)和經轉換過的讀數 26，在登月艙做第三次艙外活動結束前，獲得了第二個值為 162701.5。然而，當測站 9 到登月艙橫越時，安裝在 TGE 的支腳因搖擺鬆動和登月漫遊車相撞擊。我們相信這個震動會使得此第二個讀數更不可靠。因此，採用了 162694.5 (+5)或(-5) mGal 的初始測定值。

結論 在金牛座(Taurus-Littrow)谷得到了 162694.5 (+5mGal) 的值，這是在天體的表面上唯一的重力測量。

越過金牛座谷描繪構建了 A2D 重力輪廓，河谷側的布蓋異常值比在 LM 低約 25 mGal。就任一側面的物質而言，在河谷平原下面的是密度比為 0.8gm/cc 且厚達 1 公里的玄武岩物質，是可以解釋這異常曲線。

在月亮測量重力是一個很大挑戰。來從事這項任務，NASA花費眾多的人力及物力，而且太空人做重力測量任務背負很大的風險。

離開 Saturn V 火箭，Gene Cernan等人在任務結束前扔掉 TGE (它仍然在座落於那裡由以後的太空人去發現)，以上二件事，永遠銘記在我的腦海中。