

新竹市第 43 屆國民中小學科學展覽會
作品說明書

科 別： 地球科學

組 別： 國中組

作品名稱： 恒星與衛星的牽引力-探索潮汐鎖定的現象

關鍵字： 潮汐鎖定、潮汐力、地球

編號：

摘要

潮汐鎖定現象是天體在運行過程中，由於潮汐力的作用，逐漸使自轉週期與公轉週期同步。首先，我們使用摩擦力極低的指尖陀螺來模擬衛星自轉，並透過自製的轉動裝置來模擬衛星的圓周運動。透過測量指尖陀螺自轉一圈所需的時間之趨勢，推算出潮汐力的大小，成功解釋了潮汐鎖定的現象。我們透過實驗探討影響潮汐鎖定的因素，經由實驗結果顯示：當公轉轉速變快時，鎖定所需的時間會相對縮短；而當改變公轉的半徑時，半徑越大，鎖定的時間也越長。另外，當星球內部質量分布不均勻時，相較於質量均勻的星球，質量較不均勻的星體鎖定時間會較短。

壹、前言

一、研究動機

潮汐鎖定是宇宙中一個常見且普遍的現象，但在日常生活中卻不易察覺。有一次，老師在講解星體的關係時提到了潮汐鎖定這個概念，例如月球繞地球的公轉週期和自轉週期相同，導致月球的同一面永遠面對地球。聽完老師的解釋後，我們對這個現象產生了濃厚的興趣。於是，我們決定以潮汐鎖定作為科展的研究主題，並開始進行資料蒐集與學習。隨著了解的深入，我們發現其他研究中未顧及到的一些因素，這激發了我們的好奇心，並希望能進一步驗證宇宙中的現象，探索這有趣且深刻的天文現象，從中獲得更多的理解與發現。

二、實驗目的

1. 證明潮汐鎖定的現象
2. 探討公轉半徑不同，對潮汐力之影響
3. 探討不同比例之力矩對潮汐力的影響
4. 探討公轉轉速不同，對潮汐力之影響
5. 用公式推算潮汐鎖定的施力情形

三、文獻回顧

- NASA 發布獨特照片 地球在月亮上冉冉升起：於 2015 年 12 月 18 日發布了一張由月球勘測軌道飛行器（LRO）拍攝的獨特照片，圖片中因為月球因潮汐鎖定效應，使其自轉週期與公轉週期同步，因此從月球上面看，地球的位置幾乎是固定不變的，無法看到類似地球上月亮升起或落下的景象（許家琳, 2015）。
- 揭開月球同步自轉的“神秘”面紗：潮汐鎖定是由母星對環繞天體的引力作用造成的，月球表面不同位置因距離地球不同，所受引力大小有所差異，導致月球在地月的連線方向上略微拉長，造成潮汐隆起。同時，地球對月球的潮汐力會影響其自轉，使其最終鎖定，始終以同一面朝向地球（Haibaraemily, 2017）。

貳、實驗設備及器材

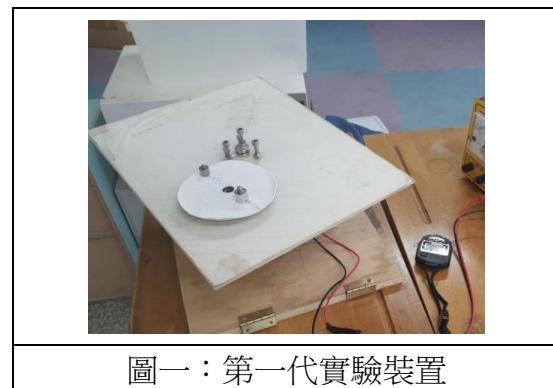
實驗裝置上，我們經過了幾次的改良：

第一代實驗裝置：

方式：直接將指尖陀螺至於轉盤上。

優點：簡單且好操作

缺點：將承載盤與公轉盤的摩擦力納入潮汐力中，導致最後使其所定的力並非純為潮汐力。



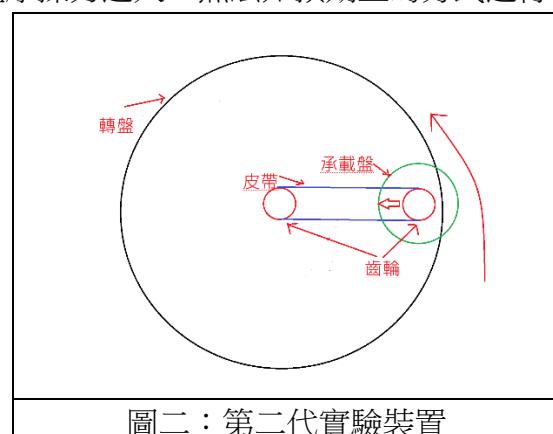
圖一：第一代實驗裝置

第二代實驗裝置：

方式：以皮帶連接轉盤的齒輪及指尖陀螺下的承載盤齒輪，當轉盤順時針公轉時，透過皮帶的帶動，使指尖陀螺下的承載盤逆時針旋轉，且兩者轉速相同，即可使承載盤只做公轉運動而不會自轉。

優點：承載盤只做公轉運動而不會自轉，可以避免摩拉力的干擾。

缺點：成品齒輪與公轉盤摩擦力過大，無法如預期上的方式運行。

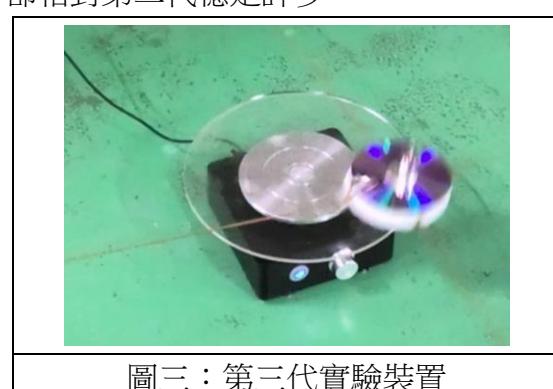


圖二：第二代實驗裝置

第三代實驗裝置：

方式：以四條彈力繩分別拉住承載盤的四個方向，使承載盤一直保持同一個方向。

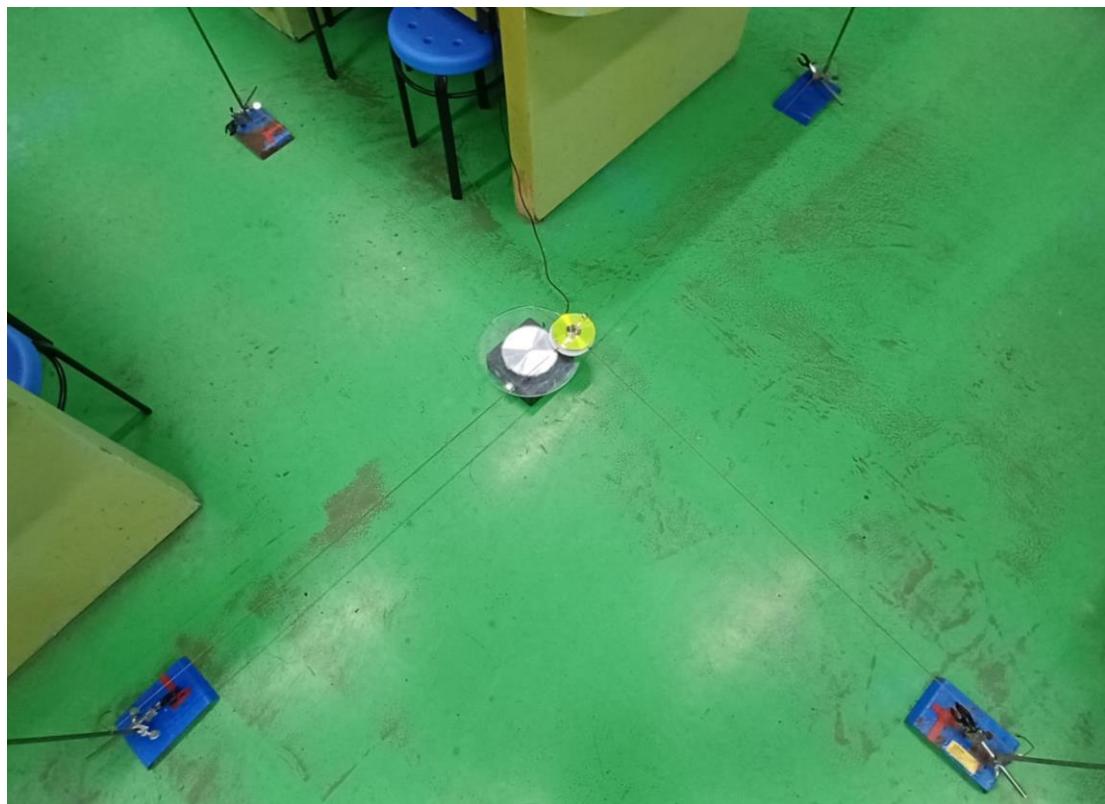
優點：同樣避免摩擦力，卻相對第二代穩定許多。



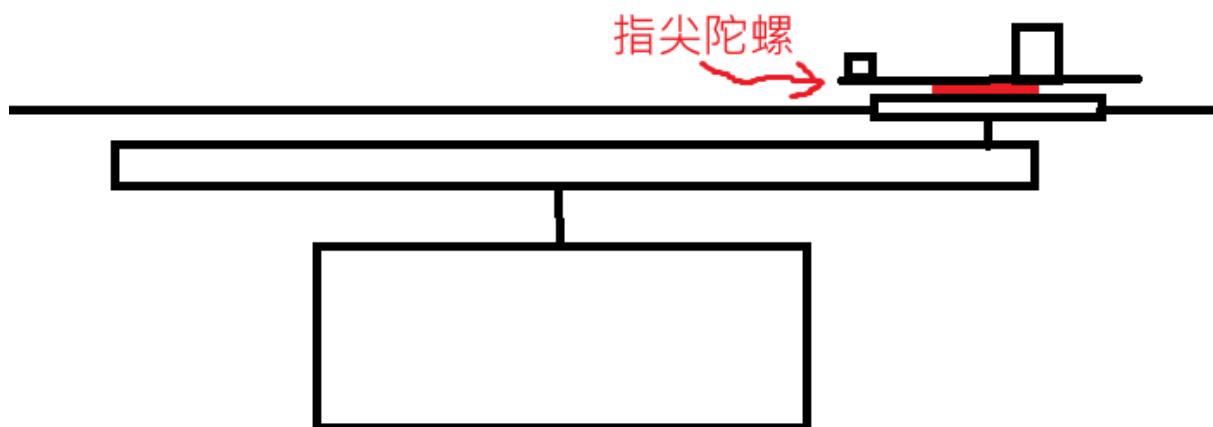
圖三：第三代實驗裝置

參、研究過程及方法

此實驗參考了其他相關的實驗報告，並使用第三代實驗裝置(圖四)來進行實驗。隨著衛星公轉的進行，潮汐力開始作用，並使指尖陀螺進入自轉狀態。最終，潮汐力的作用使得陀螺達到潮汐鎖定狀態，從而模擬了天體在公轉過程中逐漸同步自轉的現象。



(圖四)



(圖五)

實驗一、證明潮汐力的存在

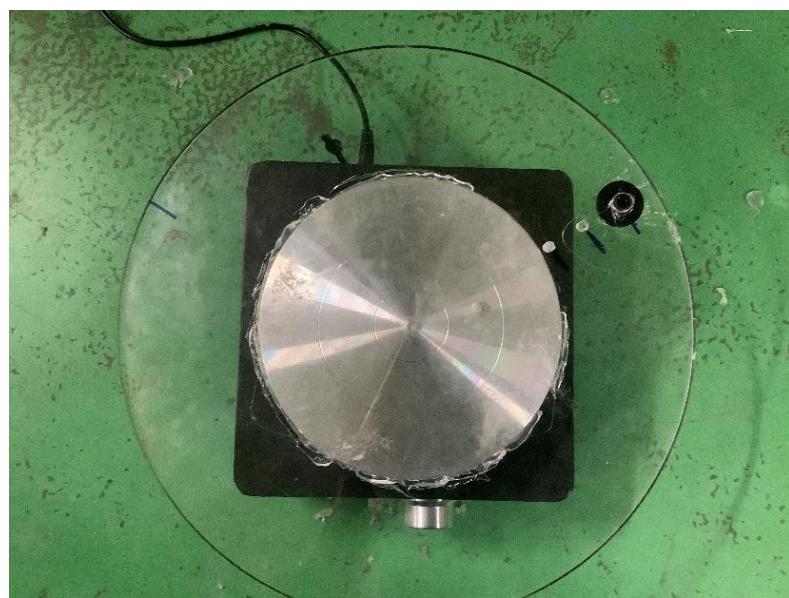
此實驗一開始指尖陀螺是處於靜止狀態，砝碼配置為 100g 與 20g(如圖六)將拉胚機電源開啟，將公轉速度調整至 0.5 秒每圈，透過第三代實驗裝置，可避免指尖陀螺公轉時所造成的摩擦力，若指尖陀螺開始進行旋轉，即是全部由拉胚機旋轉所造成之潮汐力使其轉動。



(圖六)

實驗二、探討公轉半徑不同對潮汐力的影響

由於每顆衛星距離母星的公轉半徑皆不同，本實驗透過改變公轉半徑來觀察潮汐力的影響。我們分別以三種公轉半徑：8 公分、10 公分及 12 公分(如圖七)。其餘的步驟皆和實驗一相同，依此觀察不同公轉速率對於潮汐力的影響。



(圖七)

實驗三、探討合力矩平衡兩端重量不同對潮汐力的影響

每一顆衛星的質量分布皆不相同，到底是質量平均鎖定的較快？還是質量分布不均勻的會鎖定較快？此實驗想要探討質量的分布是否會影響潮汐鎖定的狀態，我們以同力矩但重量不同的方式配置 CD 片上的砝碼，重量比分別為 1:5、1:2、2:5(圖八、圖九、圖十)搭配放置的位置 5:1、2:1、5:2，使得旋轉裝置的重心皆保持在圓心，其餘的步驟皆和實驗一相同，依此觀察不同配重對於潮汐力的影響。



重量比 1:5 距離比 5:1
(圖八)



重量比 1:2 距離比 2:1
(圖九)

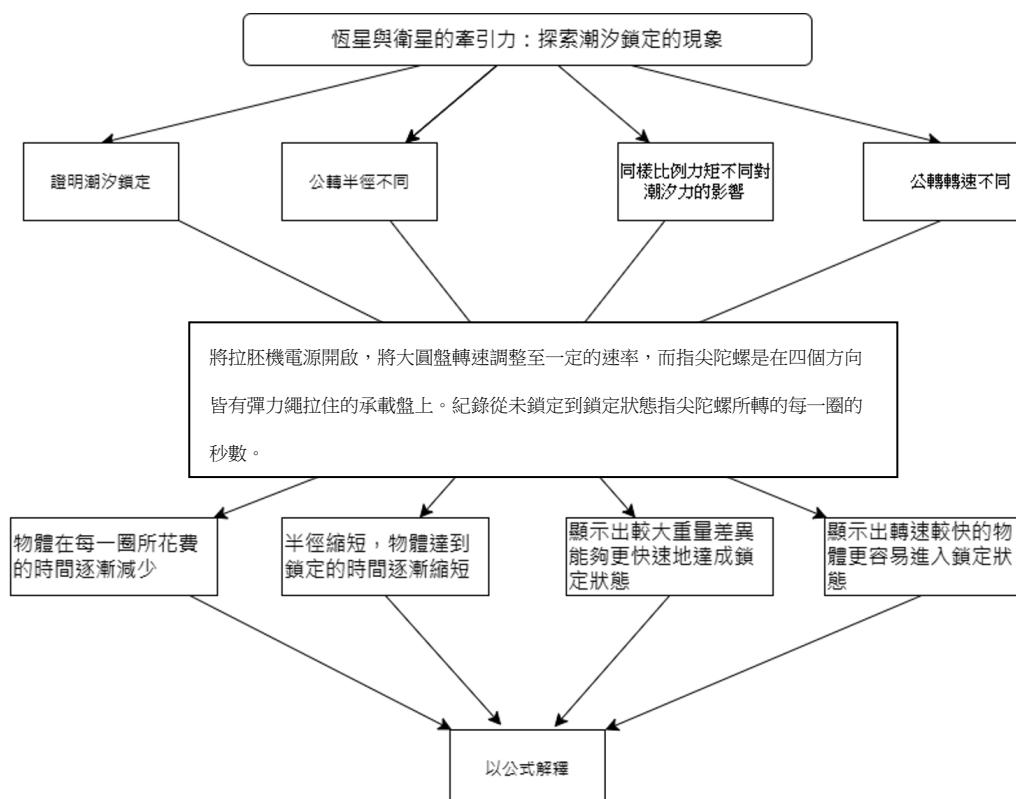


重量比 2:5 距離比 5:2
(圖十)

實驗四、探討公轉轉速不同對潮汐力的影響

各種吸引衛星的母星其自轉速率各不相同。本實驗透過不同的公轉速度觀察衛星被潮汐鎖定的速度變化。我們分別採用三種公轉速率進行實驗：每圈 1 秒、每圈約 0.67 秒及每圈 0.5 秒，其餘的步驟皆和實驗一相同，依此觀察不同公轉速率對於潮汐力的影響。

實驗流程圖



肆、實驗結果

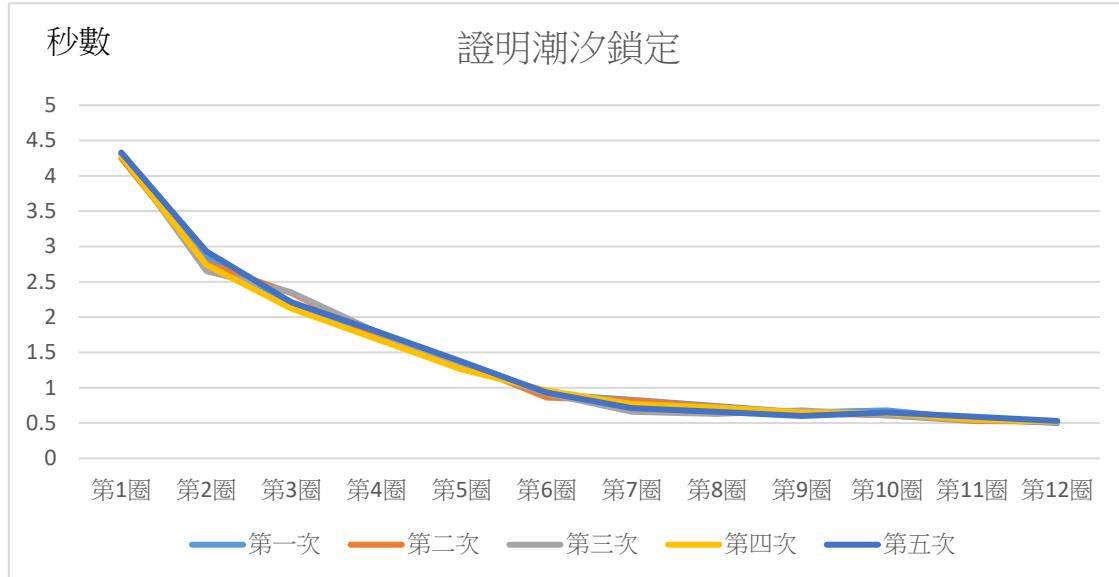
實驗一、證明潮汐力的存在

記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

配重: 20g:100g；公轉轉速:每圈 0.5 秒；旋轉半徑:12cm

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	4.32	4.25	4.32	4.28	4.33	4.30
第 2 圈	2.84	2.76	2.65	2.74	2.93	2.78
第 3 圈	2.21	2.34	2.35	2.12	2.21	2.24
第 4 圈	1.72	1.74	1.79	1.69	1.80	1.74
第 5 圈	1.33	1.35	1.31	1.26	1.37	1.32
第 6 圈	0.91	0.86	0.92	0.96	0.93	0.91
第 7 圈	0.83	0.82	0.66	0.77	0.71	0.75
第 8 圈	0.74	0.73	0.63	0.72	0.66	0.69
第 9 圈	0.65	0.64	0.68	0.65	0.60	0.64
第 10 圈	0.68	0.61	0.61	0.64	0.65	0.63
第 11 圈	0.56	0.53	0.54	0.55	0.59	0.55
第 12 圈	0.50	0.52	0.52	0.52	0.53	0.51
合計	17.29	17.15	16.98	16.90	17.31	17.12

單位：秒/圈



實驗一小結：

在本次實驗中，每一次的實驗結果均顯示，隨著時間的推移，物體在每一圈所花費的時間逐漸減少，顯示出物體受到某種牽引力的加速作用。最終，物體的運動趨近於穩定的公轉轉速，這一現象證實了潮汐力的存在，並且支持了物體在受潮汐力影響下的加速過程。

實驗二、探討公轉半徑不同對潮汐力的影響

記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

公轉半徑:8cm

配重: 20g:100g；公轉轉速:每圈 0.5 秒

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	2.88	2.93	2.86	2.91	3.03	2.92
第 2 圈	1.75	1.77	1.83	1.91	1.72	1.79
第 3 圈	1.23	1.43	1.29	1.30	1.26	1.30
第 4 圈	1.00	1.01	0.91	1.07	0.93	0.98
第 5 圈	0.88	0.75	0.81	0.73	0.83	0.80
第 6 圈	0.72	0.68	0.79	0.64	0.76	0.71
第 7 圈	0.62	0.63	0.61	0.58	0.64	0.61
第 8 圈	0.59	0.56	0.57	0.50	0.61	0.56
第 9 圈	0.58	0.54	0.57	0.54	0.59	0.56
第 10 圈	0.56	0.55	0.56	0.58	0.57	0.56
第 11 圈	0.52	0.55	0.53	0.54	0.56	0.54
第 12 圈	0.51	0.53	0.51	0.53	0.54	0.52
合計	11.84	11.93	11.84	11.83	12.04	11.89

單位：秒/圈

記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

公轉半徑:10cm

配重: 20g:100g；公轉轉速:每圈 0.5 秒

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	3.76	3.54	3.86	3.49	3.35	3.60
第 2 圈	1.99	2.01	2.09	2.03	1.90	2.00
第 3 圈	1.66	1.78	1.56	1.73	1.65	1.67
第 4 圈	1.11	1.21	1.14	1.24	1.3	1.20
第 5 圈	0.98	0.91	0.99	0.95	0.93	0.95
第 6 圈	0.91	0.83	0.87	0.88	0.84	0.86
第 7 圈	0.75	0.77	0.79	0.83	0.78	0.78
第 8 圈	0.68	0.70	0.75	0.71	0.73	0.71
第 9 圈	0.62	0.64	0.66	0.65	0.61	0.63
第 10 圈	0.57	0.56	0.60	0.58	0.55	0.57
第 11 圈	0.55	0.57	0.56	0.56	0.54	0.55
第 12 圈	0.54	0.53	0.54	0.56	0.53	0.54
合計	14.12	14.05	14.41	14.21	13.71	14.10

單位：秒/圈

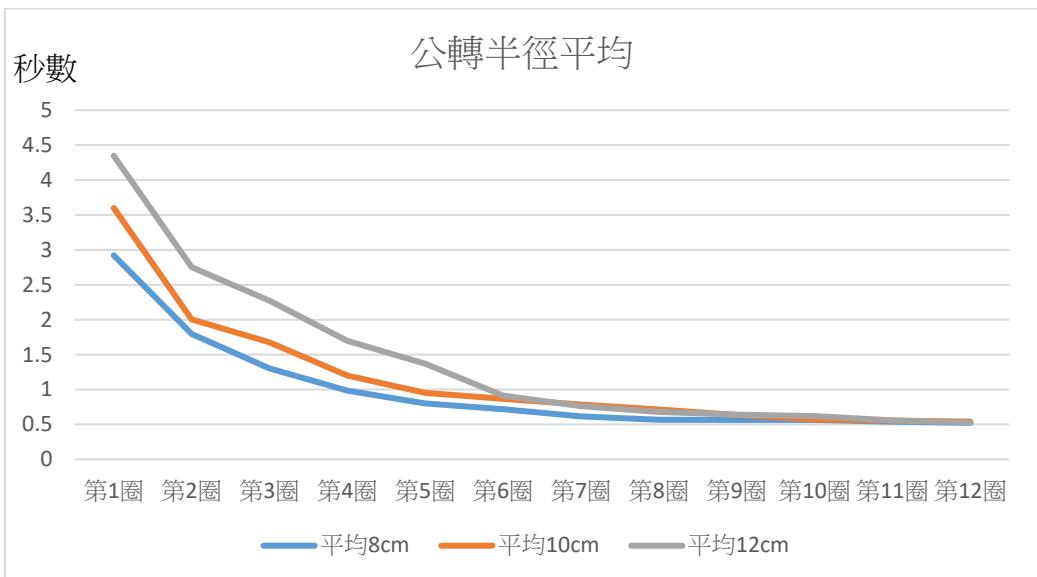
記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

公轉半徑:12cm

配重: 20g:100g；公轉轉速:每圈 0.5 秒

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	4.33	4.42	4.45	4.29	4.25	4.34
第 2 圈	2.77	2.81	2.69	2.75	2.74	2.75
第 3 圈	2.35	2.25	2.23	2.32	2.21	2.27
第 4 圈	1.63	1.76	1.62	1.67	1.81	1.69
第 5 圈	1.42	1.37	1.43	1.29	1.34	1.37
第 6 圈	0.93	0.87	0.96	0.88	0.92	0.91
第 7 圈	0.81	0.75	0.76	0.73	0.76	0.76
第 8 圈	0.67	0.66	0.67	0.69	0.71	0.68
第 9 圈	0.65	0.63	0.65	0.64	0.63	0.64
第 10 圈	0.59	0.65	0.63	0.61	0.62	0.62
第 11 圈	0.56	0.55	0.52	0.59	0.57	0.55
第 12 圈	0.54	0.51	0.50	0.53	0.55	0.52
合計	17.25	17.23	17.11	16.99	17.11	17.13

單位：秒/圈



實驗二小結：

在本次實驗中，從平均圖表中可見，半徑越短，物體越早達到鎖定狀態。根據實驗數據的總結，鎖定所需的时间依半徑長短依序為 12cm，接著是 10cm，最後是 8cm，顯示出隨著半徑縮短，物體達到鎖定的時間逐漸縮短。

實驗三、探討合力矩平衡兩端重量不同對潮汐力的影響

記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

重量 2:5(20g: 50g)

轉速:每圈 0.67 秒；公轉半徑:12cm

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	4.17	4.12	4.22	4.13	4.25	4.178
第 2 圈	3.12	3.21	3.35	3.42	3.64	3.34
第 3 圈	2.47	2.69	2.32	2.45	2.51	2.48
第 4 圈	1.96	1.96	1.87	1.85	1.81	1.89
第 5 圈	1.73	1.72	1.62	1.59	1.67	1.66
第 6 圈	1.41	1.39	1.29	1.34	1.45	1.37
第 7 圈	1.17	1.23	1.17	1.14	1.08	1.15
第 8 圈	0.87	0.85	0.90	0.88	0.81	0.86
第 9 圈	0.80	0.77	0.81	0.69	0.75	0.76
第 10 圈	0.71	0.72	0.74	0.72	0.73	0.72
第 11 圈	0.69	0.67	0.72	0.69	0.70	0.69
第 12 圈	0.68	0.67	0.67	0.69	0.68	0.67
合計	19.78	20.00	19.68	19.59	20.08	19.82

單位：秒/圈

記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

重量 1:2(50g:100g)

轉速：每圈 0.67 秒；公轉半徑:12cm

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	5.29	5.31	5.46	5.53	5.42	5.40
第 2 圈	3.66	3.64	3.54	3.61	3.71	3.63
第 3 圈	2.62	2.67	2.57	2.49	2.51	2.57
第 4 圈	2.32	2.29	2.21	2.14	2.09	2.21
第 5 圈	1.99	1.96	1.91	1.89	1.87	1.92
第 6 圈	1.58	1.48	1.57	1.47	1.44	1.50
第 7 圈	1.04	1.09	1.03	1.13	1.08	1.07
第 8 圈	0.93	0.92	0.96	0.98	0.92	0.94
第 9 圈	0.84	0.86	0.81	0.85	0.84	0.84
第 10 圈	0.72	0.75	0.75	0.79	0.74	0.75
第 11 圈	0.69	0.68	0.70	0.72	0.68	0.69
第 12 圈	0.67	0.68	0.69	0.67	0.68	0.67
合計	22.35	22.33	22.20	22.27	21.98	22.22

單位：秒/圈

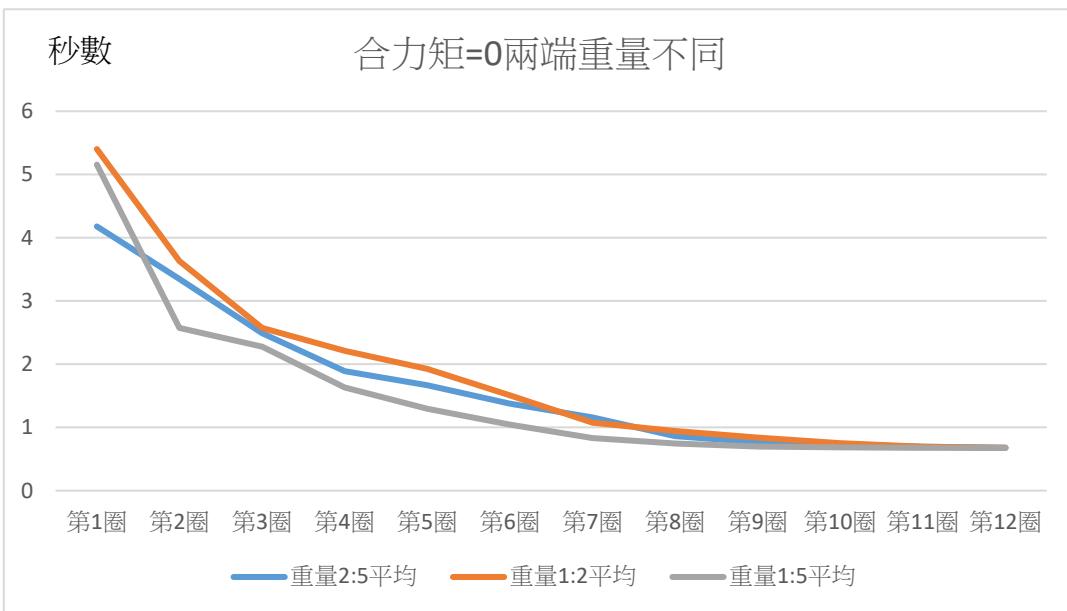
記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

重量 1:5(20g:100g)

轉速：每圈 0.67 秒；公轉半徑:12cm

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	5.09	5.15	5.17	5.14	5.23	5.15
第 2 圈	2.57	2.56	2.58	2.55	2.60	2.57
第 3 圈	2.27	2.21	2.34	2.25	2.31	2.27
第 4 圈	1.61	1.65	1.68	1.63	1.59	1.63
第 5 圈	1.34	1.27	1.26	1.29	1.31	1.29
第 6 圈	1.06	1.04	0.99	1.03	1.10	1.04
第 7 圈	0.84	0.82	0.86	0.83	0.81	0.83
第 8 圈	0.73	0.72	0.76	0.75	0.77	0.74
第 9 圈	0.70	0.69	0.72	0.71	0.67	0.69
第 10 圈	0.69	0.67	0.69	0.68	0.69	0.68
第 11 圈	0.68	0.68	0.67	0.69	0.67	0.67
第 12 圈	0.67	0.67	0.69	0.67	0.68	0.67
合計	18.25	18.13	18.41	18.22	18.43	18.28

單位：秒/圈



實驗三小結：

從實驗圖表中可以看出，當兩端的重量差異越大，物體越容易達到鎖定狀態。雖然圖表中顯示，平均(2:5)與平均(1:2)兩者在達到鎖定的圈數大約都集中在第 9 圈，但根據數據合計仍可發現，2:5 的配置所花費的時間較少，顯示出較大重量差異能夠更快速地達成鎖定狀態。

實驗四、公轉轉速不同

記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

轉速:每圈 1 秒

配重: 100g : 20g ; 公轉半徑:12cm

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	6.21	6.31	6.52	6.71	6.99	6.54
第 2 圈	3.51	3.98	3.44	3.50	3.68	3.62
第 3 圈	3.21	3.10	3.05	3.07	3.17	3.12
第 4 圈	2.91	2.87	2.96	2.90	2.84	2.89
第 5 圈	2.61	2.59	2.65	2.68	2.53	2.61
第 6 圈	2.70	2.60	2.43	2.59	2.61	2.58
第 7 圈	2.24	2.12	2.32	2.17	2.09	2.18
第 8 圈	1.74	1.65	1.84	1.59	1.62	1.68
第 9 圈	1.63	1.33	1.42	1.23	1.43	1.40
第 10 圈	1.22	1.12	1.11	1.13	1.19	1.15
第 11 圈	1.07	1.01	1.05	1.04	1.06	1.04
第 12 圈	1.02	1.05	1.04	1.05	1.02	1.03
合計	30.07	29.73	29.83	29.66	30.23	29.90

單位：秒/圈

記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

轉速:每圈 0.67 秒

配重: 100g : 20g ; 公轉半徑:12cm

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	4.29	4.27	4.23	4.54	4.47	4.36
第 2 圈	2.61	2.45	2.63	2.26	2.57	2.50
第 3 圈	2.09	2.12	2.23	2.04	2.08	2.11
第 4 圈	1.78	1.81	1.69	1.64	1.73	1.73
第 5 圈	1.53	1.34	1.65	1.46	1.39	1.47
第 6 圈	1.38	1.24	1.19	1.27	1.18	1.25
第 7 圈	1.06	1.05	1.10	1.07	1.07	1.07
第 8 圈	0.74	0.77	0.76	0.79	0.73	0.75
第 9 圈	0.71	0.75	0.73	0.69	0.69	0.71
第 10 圈	0.69	0.69	0.69	0.72	0.71	0.70
第 11 圈	0.69	0.68	0.67	0.71	0.69	0.68
第 12 圈	0.68	0.68	0.67	0.67	0.68	0.67
合計	18.25	17.85	18.24	17.86	17.99	18.03

單位：秒/圈

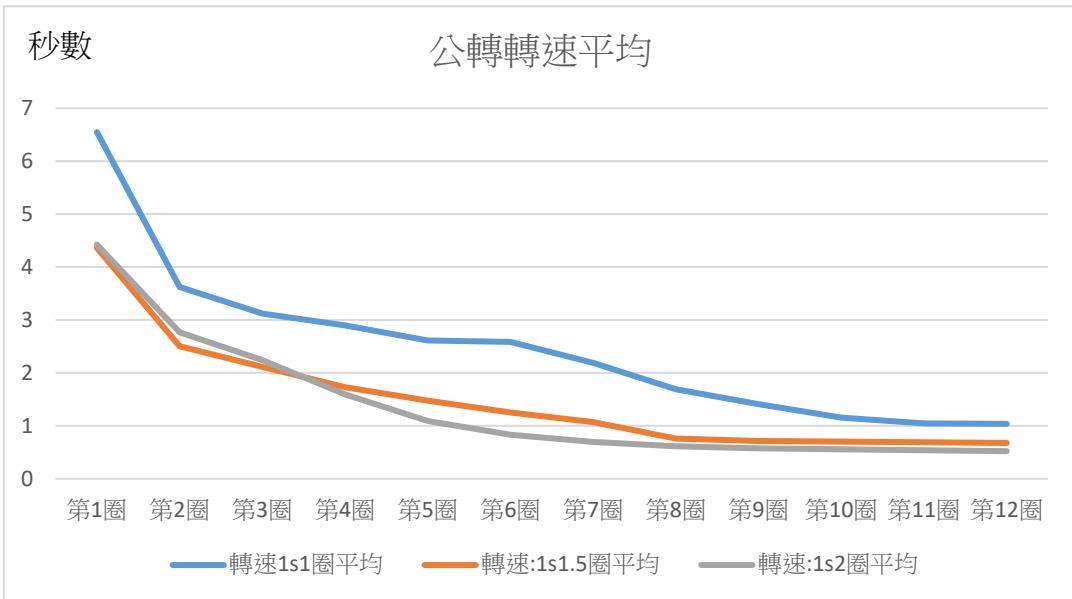
記錄每一圈所花費的時間(單位：s/圈)

轉速:每圈 0.5 秒

配重: 100g : 20g ; 公轉半徑:12cm

次 圈	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
第 1 圈	4.28	4.44	4.55	4.32	4.53	4.42
第 2 圈	2.77	2.86	2.76	2.53	2.91	2.76
第 3 圈	2.22	2.31	2.18	2.15	2.34	2.24
第 4 圈	1.55	1.64	1.57	1.54	1.66	1.59
第 5 圈	1.11	1.14	1.09	1.03	1.08	1.09
第 6 圈	0.89	0.86	0.75	0.83	0.82	0.83
第 7 圈	0.69	0.74	0.63	0.66	0.75	0.69
第 8 圈	0.65	0.62	0.57	0.63	0.59	0.61
第 9 圈	0.57	0.59	0.56	0.58	0.57	0.57
第 10 圈	0.54	0.57	0.55	0.56	0.56	0.55
第 11 圈	0.52	0.56	0.53	0.54	0.54	0.53
第 12 圈	0.52	0.51	0.52	0.52	0.53	0.52
合計	16.31	16.84	16.26	15.89	16.88	16.43

單位：秒/圈



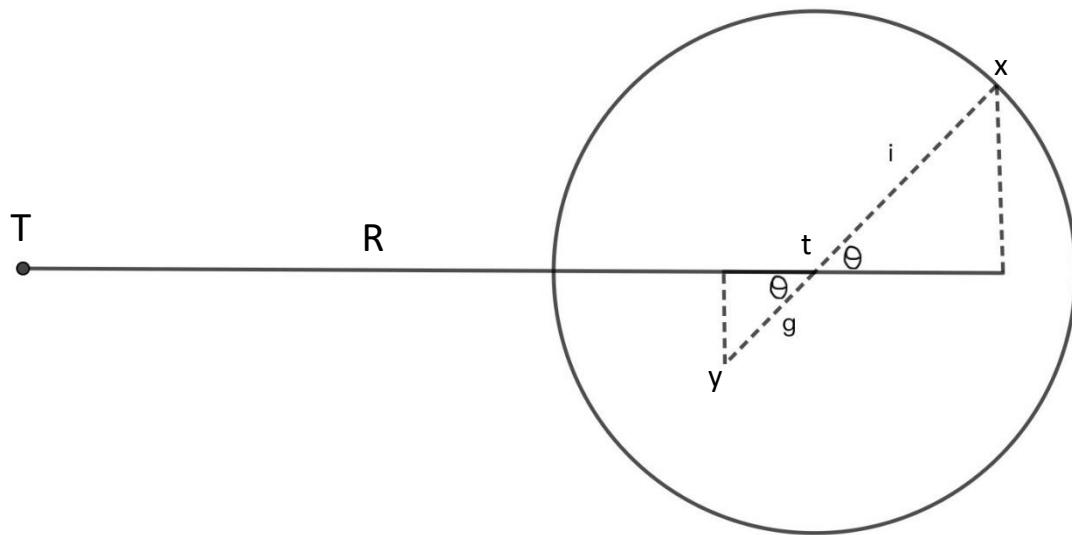
實驗四小結：

從實驗圖表中可以觀察到，公轉轉速較快的物體顯著較快達到鎖定狀態。由於三者的公轉轉速不同，因此圖中的折線接近平坦時，即代表物體已達到鎖定狀態，顯示出轉速較快的物體更容易進入鎖定狀態。

伍、討論

一、公式推導

此圖為實驗裝置模擬圖：



定義：

T：公轉中心

t：自轉中心

R：公轉半徑

x：自轉質點

y：自轉質點

i : $\bar{x}\bar{t}$

g : $\bar{y}\bar{t}$

m_1 : x 的質量

m_2 : y 的質量

M : 母星質量

v : 公轉轉速

運算：

$$\bar{x}T = \sqrt{(R + i|\cos\theta|)^2 + i^2\sin^2\theta} = \sqrt{R^2 + 2R i|\cos\theta| + i^2}$$

$$\bar{y}T = \sqrt{(R - g|\cos\theta|)^2 + g^2\sin^2\theta} = \sqrt{R^2 - 2R g|\cos\theta| + g^2}$$

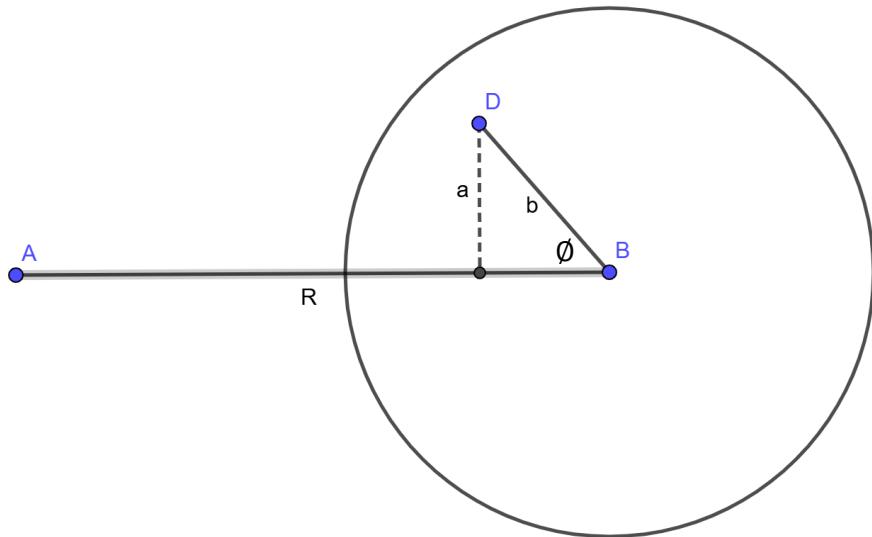
若 $m_1 = km_2$ ，因力矩要平衡，所以 $m_1 i = m_2 g$ ，又 $m_1 = km_2$ ，則 $g = ki$ ，但宇宙中向心力僅是引力

中的一環，因此我們將其半徑帶入公式 $F = \frac{GMm}{r^2}$

得出：

$$x \text{ 質點的引力} : F = \frac{GMkm_2}{R^2 + 2Ri|\cos\theta| + i^2}$$

$$y \text{ 質點的引力} : F = \frac{GMm_2}{R^2 - 2Rki|\cos\theta| + k^2i^2}$$



定義：

D：衛星內的一質點

B：行星的質心

b：衛星中心到質點 D 的距離

R：公轉半徑

v：公轉轉速

$$\overline{DA} = \sqrt{(R - b|\cos\theta|)^2 + b^2 \sin^2\theta} = \sqrt{R^2 - 2Rb|\cos\theta| + b^2}$$

若以引力 $F = \frac{GMm}{r^2}$ 來計算又可得 $F = \frac{GMm}{R^2 - 2Rb|\cos\theta| + b^2}$ (M 為母星質量、 m 為衛星質量)

代入月球和地球的實際值：

地球質量： $M=5.972\times10^{24}\text{kg}$

月球質量： $m=7.348\times10^{22}\text{kg}$

地球與月球平均距離： $R=3.844\times10^8\text{m}$

萬有引力常數： $G=6.674\times10^{-11}\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$

$$b=1\times10^6\text{m}; \theta=45^\circ, \text{即} \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0.707$$

以 $F = \frac{GMm}{R^2 - 2Rb|\cos\theta| + b^2}$ 算出引力為 $1.989 \times 10^{20} \text{ N}$

以 $F = \frac{GMm}{r^2}$ 得出引力為 $1.982 \times 10^{20} \text{ N}$

兩者的比值：1.0037，也就是和真實值相差大約 0.37%，誤差值不到 1%

若將數值改為 $b=1.7374 \times 10^6 \text{ m}$ ，也就是月球半徑； $\theta=60^\circ$ ，帶入公式得到 $1.991 \times 10^{20} \text{ N}$

兩者的比值：1.0045，也就是和真實值相差大約 0.45%，誤差值仍不到 1%。將各質點的引

力合起來，即是 $b=0$ ， $F = \frac{GMm}{r^2}$ 。

此通式可以帶入衛星上的任意點：

1. 改變半徑： R 越大， $\sqrt{R^2 - 2Rb|\cos\theta| + b^2}$ 就越大，則 F_c 也就越小，潮汐鎖定的時間也就越長； R 越小， $\sqrt{R^2 - 2Rb|\cos\theta| + b^2}$ 就越小，則 F_c 也就越大，潮汐鎖定的時間也就越短。符合公轉半徑對於潮汐鎖定時間的影響。
2. 改變質量，質量愈大，向心力愈大，縮短潮汐鎖定的時間。
3. 改變公轉轉速，轉速愈快，向心力愈大，縮短潮汐鎖定的時間。
4. 合力矩=0 但兩端重量不同，則 $\sqrt{R^2 - 2Rb|\cos\theta| + b^2}$ 中，質點愈靠近自轉中心， b 愈小，則向心力愈大。
5. 當力矩相同時，兩端重心偏移越大，越容易達成潮汐鎖定。

二、延伸和比較

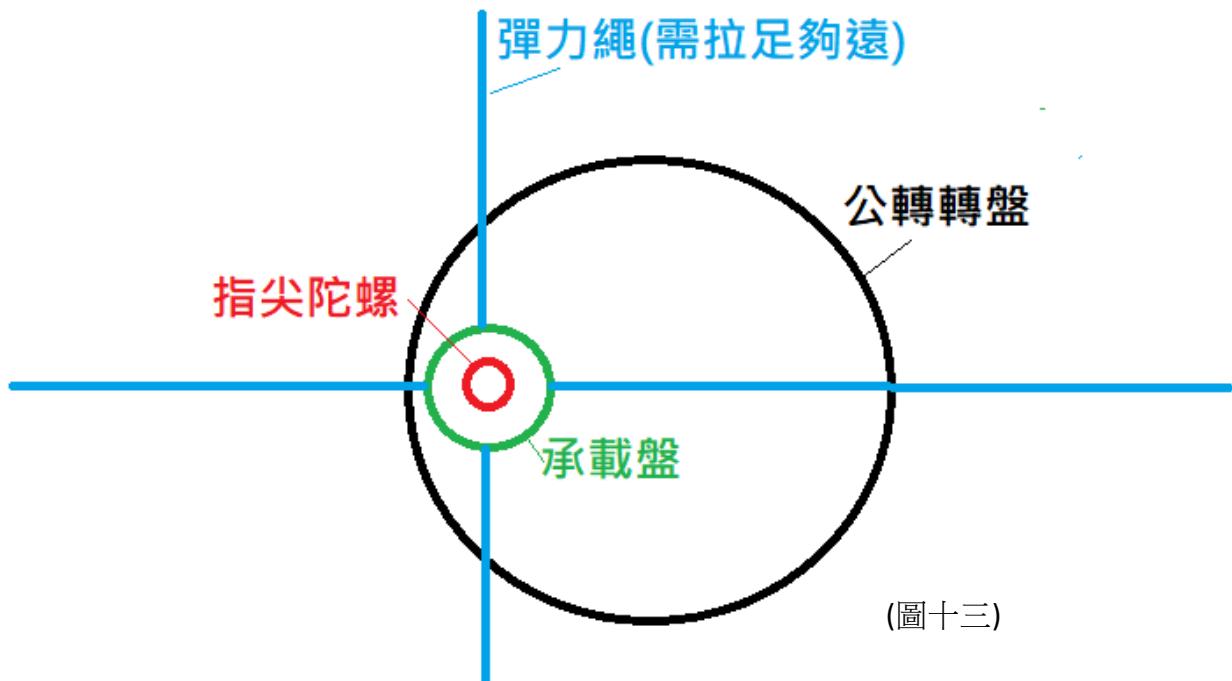
由於此實驗有經過多次的改良，因此將在以下進行比較。第一代的實驗器材是直接將指尖陀螺裝在公轉板子上面(圖十)，但卻誤將摩擦力也加入潮汐力中。為解決此問題，我們添加一片小瓦楞板，由四條彈力繩拉住(圖十一)，小瓦楞板即可一直保持同一方向，去除摩擦力的影響，就是我們此次實驗用的實驗裝置，俯視圖(圖十二)。由於少了摩擦力，因此可以發現用第三代器材做出的數據的時間都明顯大於第一代器材做出的數據。



(圖十一)



(圖十二)



(圖十三)

四、人為誤差

當我們進行實驗時，無法做到精確測量，且外在環境因素會對結果產生影響，因此測量數據和實驗結果會有誤差。例如，彈力繩在多次使用後，其彈力係數會下降，導致彈力減弱；而砝碼可能因為生鏽而有所變化，導致其質量與真實重量有所偏差。另外，由於初始放置位置的微小偏差，也會造成功力矩的變化。在操作過程中，雖然數據是由 Tracker 進行記錄，但由於其測量精度的限制，仍會存在誤差。若要提高實驗精確度，則需使用更高精度的儀器，例如能夠精確測量時間的設備，並克服手動操作所帶來的問題。

陸、結論

1. 公轉半徑愈小，潮汐力愈大，愈容易達成潮汐鎖定
2. 質心偏移愈大，造成潮汐力偏差，愈容易達到潮汐鎖定
3. 公轉轉速愈快，愈容易達到潮汐鎖定
4. 潮汐鎖定時，衛星上重量較重的那一邊會朝向公轉中心
5. 潮汐力使衛星上的質點對於公轉中心的向心力的合力，造成潮汐摩擦，進而使衛星與母星轉動速度相同，達到潮汐鎖定

柒、參考資料與文獻

1. 新竹市第 40 屆中小學科學展覽會. (2022). 與月亮的約定-探索神秘的潮汐鎖定現象. 地球科學國中組第二名. Retrieved from <https://science.hc.edu.tw/fileUpload/submitEntries/111%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E5%9C%8B%E4%B8%AD%E7%B5%84%E5%9C%80%E7%90%83%E7%A7%91%E5%AD%B8%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E5%90%8D0527-10431850.pdf>
2. 許家琳. (2015, December 20). NASA 發布獨特照片：地球在月亮上冉冉升起. 大紀元時報. Retrieved from <https://www.epochtimes.com/b5/15/12/20/n4600039.htm>
3. Haibaraemily. (2017). 揭開月球同步自轉的「神秘」面紗. 知乎專欄. Retrieved from <https://zhuanlan.zhihu.com/p/25325495>