物理學史研習會（八）

手冊

主辦：東吳大學物理學系

協辦：教育部普通高級中學課程物理學科中心

高雄市立高雄中學 科學館 視聽教室

2016 年 10 月 29 日

前言

東吳大學物理學系一向認為物理學史在人類文化發展中具有重大意義，因而重視物理學史的教育，曾經開過四次「物理學史」的課。

2013 年 9 月 28 日及 10 月 5 日，本學系於東吳大學外雙溪校區接連舉辦「物理學史研習會」（一）及（二）；2014 年 10 月 18 日及 25 日復於東吳大學及臺中第一中學舉辦「2014 物理學史研習會」（三）及（四）；2015 年 10 月 24 日及 31 日再於東吳大學及高雄市立高雄中學舉辦「2015 物理學史研習會」（五）及（六）。這六次研習會都因教育部「普通高級中學課程物理學科中心」參與協辦，得廣邀高中物理教師參加，裨益高中物理教育，同時增進相關學者交流，嘉惠在校學子。

今年本學系再接再厲，於 10 月 22 日及 29 日繼續舉辦兩場「研習會」；「研習會（七）」仍在東吳大學舉行，「研習會（八）」續安排在高雄市立高雄中學。因為去年天文觀測首次發現重力波，適在愛因斯坦提出廣義相對論之後一百年，今年特選定「天文學」為研習會的主題。我們特別邀請到中央研究院物理研究所的余海禮研究員講「天文觀測對廣義相對論的檢驗」，他長年從事場論與宇宙學的研究。

關於西洋的天文學史，我們請到李精益教授講「從哥白尼到哈伯」，他近年校訂出版多部有關科學史與物理學史的書籍。關於中國古代的天文學，我們請涉獵中國古籍的本學系任慶運教授講「中國上古的曆法」。又，探討任一門學問的歷史，必須認識其工具的發展，所以我們請到在臺北市天文科學教育館任職多年的葛必揚博士講「望遠鏡發展史」。

許多曾經參加研習會的與會者希望多有些討論的機會，所以這次研習會除了每一場講演後容有討論外，最後特別安排「綜合討論——天文學與物理學的關係」，請本學系的資深教授劉源俊引言。

講演的書面資料與錄影，將會是後人研習的重要參考文獻。連續四年舉辦，已使「物理學史研習會」成為東吳大學物理學系的一項特色活動。未來本學系希望持續舉辦，每次訂定一個主題，俾利集中研習的焦點；希望大家繼續支持。

東吳大學物理學系主任

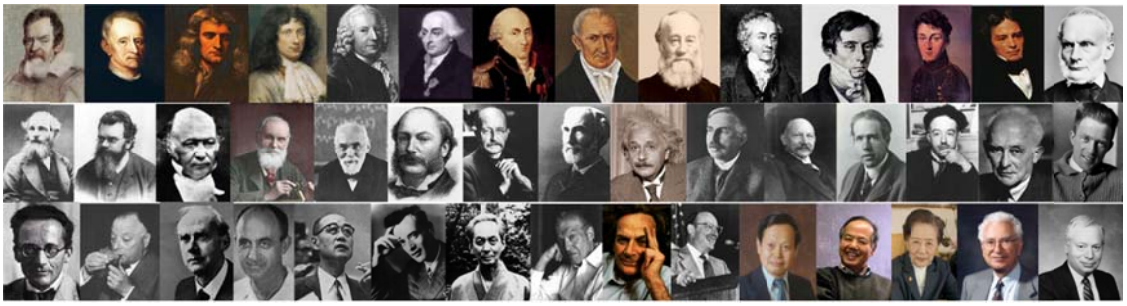
王俊賢 謹誌

中華民國 105 年 10 月 22 日

物理學史研習會（八）

手冊

目 錄



物理學史研習會（八）

時間：2016 年 10 月 29 日（星期六）

地點：高雄市立高雄中學

主辦：東吳大學物理學系教學研發中心

協辦：教育部普通高級中學課程物理學科中心

時　間	講　者	講　題
09:30~09:35	**謝文斌**（高雄市立高雄中學校長）	開幕致詞
09:35~10:50	**李精益**（文藻外語大學通識教育中心副教授） 討論	**從哥白尼到哈伯**
10:50~12:05	**葛必揚**（臺北市立天文科學教育館副研究員） 討論	**望遠鏡發展史**
12:10 ~ 13:10 午餐		
13:10~14:25	**任慶運**（東吳大學物理學系副教授） 討論	**中國上古的曆法**
14:25~15:40	**余海禮**（中央研究院物理研究所研究員） 討論	**天文觀測對廣義相對論的檢驗**
15:40 ~ 16:00 茶敘		
16:00~17:00	**綜合座談——天文學與物理學的關係** **引言：劉源俊**（東吳大學物理學系名譽教授）	

講師簡介

余海禮中研院物理研究所研究員

出生於香港，定居於台灣.。

美國匹茲堡大學（U. of Pittsburg）物理博士，英國修咸頓大學（University of Southampton）博士後研究。曾任教於美國、英國、臺灣等大學。曾任史丹福大學、UCLA、SLAC 等地訪問學人。

研究興趣包括場論及宇宙論、粒子物理、非平衡物理、數位宇宙論及物理。

科學研究之餘，寫作科幻小說、武俠小說自娛。科普著作有：《星空下的沈思》（大塊出版社）、《相對論百年故事 》（大塊出版社，獲得本年度的吳大猷科普獎—銀籤獎)。

李精益 文藻外語大學通識教育中心副教授。

1960 年出生於臺灣桃園。台灣大學物理學士，清華大學物理碩士，美國 Uni. of Texas at Austin 物理博士。

自大學以來一直保持對科學/技術史、科學哲學及科學與人文社會學科間交互影響等課題的興趣。

近二十年來積極參與科學普及化的工作，撰寫文章及翻譯書籍；並曾審校數十本書，涵蓋題材廣泛，其中包括吳國盛著《科學的歷程》（科技圖書股份有限公司，2010 年 5 月）。最近剛完成校訂郭奕玲、沈慧君著《物理學史（第二版)》（五南出版社，待出版）。

對通識教育課程有一構想，希望在人類文明演進的架構中，探討科學、技術在其中扮演的角色，它們各自的重大發展，彼此間的互動乃至科技與經濟、社會、政治諸層面的關聯等課題。

葛必揚 臺北市立天文科學教育館副研究員。

畢業於國立清華大學物理系，美國馬里蘭大學天文所博士。

曾任天文館研究組組長、展示組組長，及國立台灣師範大學地球科學系副教授等職。

目前主要工作為協助推展天文館各項研究、展演、活動研發與執行，以及新聞發佈、輿情處理與為民服務考核；並負責督辦天文館展示更新工程。

任慶運，東吳大學物理學系副教授。

生於 1953 年。交通大學電子物理學系畢業（1975），清華大學物理碩士（1977）、美國 University of Maryland 博士（1992）。

曾任東吳大學物理系主任。

興趣與專長在理論物理、哲學、佛學、文史、經典教育。

著有《物理數學》講義，與劉源俊合編《科學經典選讀》。未竟關於佛學研究著作包括《南山律在家備覽略編學律劄記》等四種。

劉源俊 東吳大學物理學系名譽教授。

臺灣大學理學士（1966），美國 Columbia University 大學物理學博士（1972）。

在東吳大學物理學系任教已 44 年。曾任東吳大學物理學系主任、理學院院長、教務長（1972~1976）、校長（1996~2004）。又曾任臺北市立教育大學校長（2006~2008）。

在美國留學期間參與發起《科學月刊》，回臺後曾擔任總編輯、社長、理事長等重要工作二十餘年。現任臺北市科學出版事業基金會董事長。

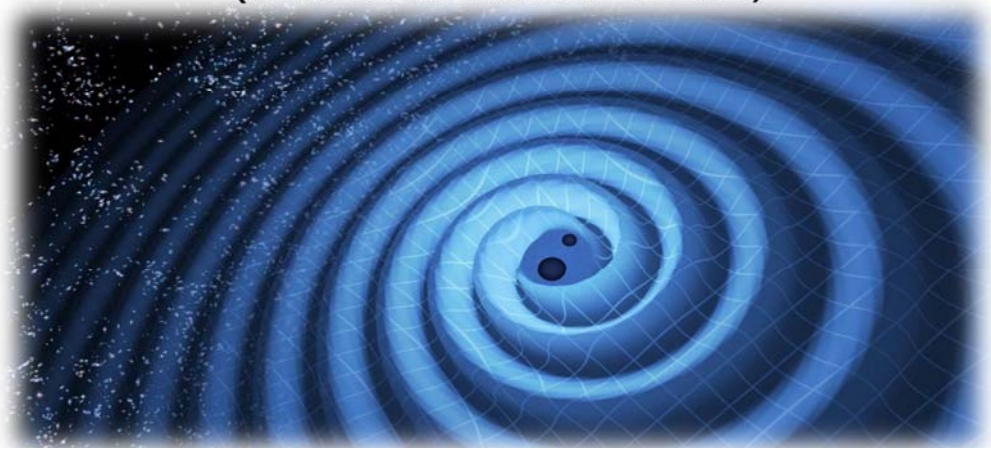
曾獲教育部「社會教育獎章」（1982）、教育部「教學特優教師獎」（1989）、中華民國物理教育學會「物理教育傑出貢獻獎」（1990, 2008, 2012）。

興趣與專長主要在物理教育、教育理念與制度、文化發展、高等教育。

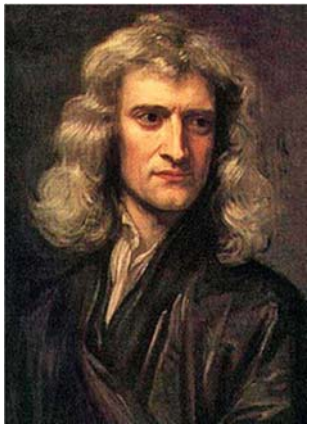
天文觀測對廣義相對論的檢驗

余海禮

(感謝林俊鈺提供部份圖文)



牛頓 (1642-1727)



- 三大運動定律
  1. 慣性 (靜者恆靜動者恆動)
  2. F=ma (推越大力加速越快，越重越難推)
  3. 作用力與反作用力
- 重力理論：萬有引力

超距力 (Action at a distance)　!!!???

相對性原理：車內外的現象不同、物理定律相同

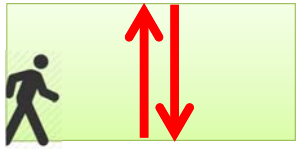
- 伽利略 (牛頓) 相對性原理：速度相加性

https://www.youtube.com/watch?v=Yr9S7IcRAPk

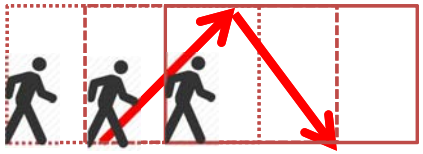
愛因斯坦 的 狹義相對論 (1905)

- 如果棒球換成光，結論一樣嗎? ➔ No, 光速恆定

➔ 移動中**時間看似變慢**



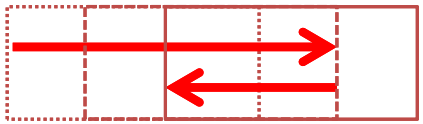
車廂內



月台上看起來

➔ 移動中車廂看似**縮短 (長度=光速x時間)**

車廂長度



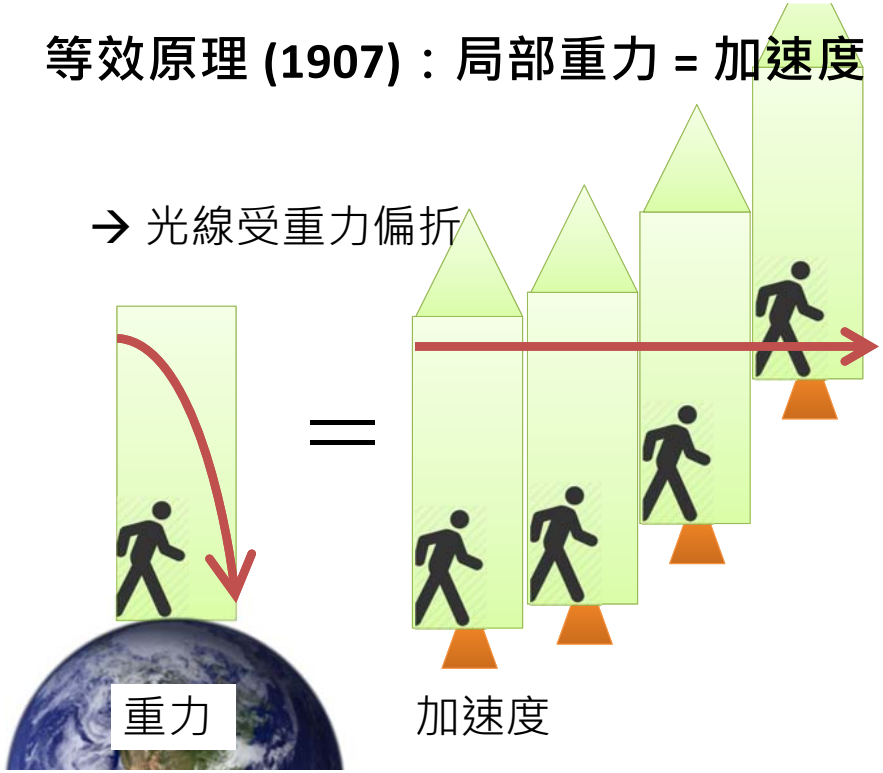
月台上看起來

- 時間不是絕對的 ➔ **時空**
- 狹義相對性原理 ➔ 不同慣性座標系下

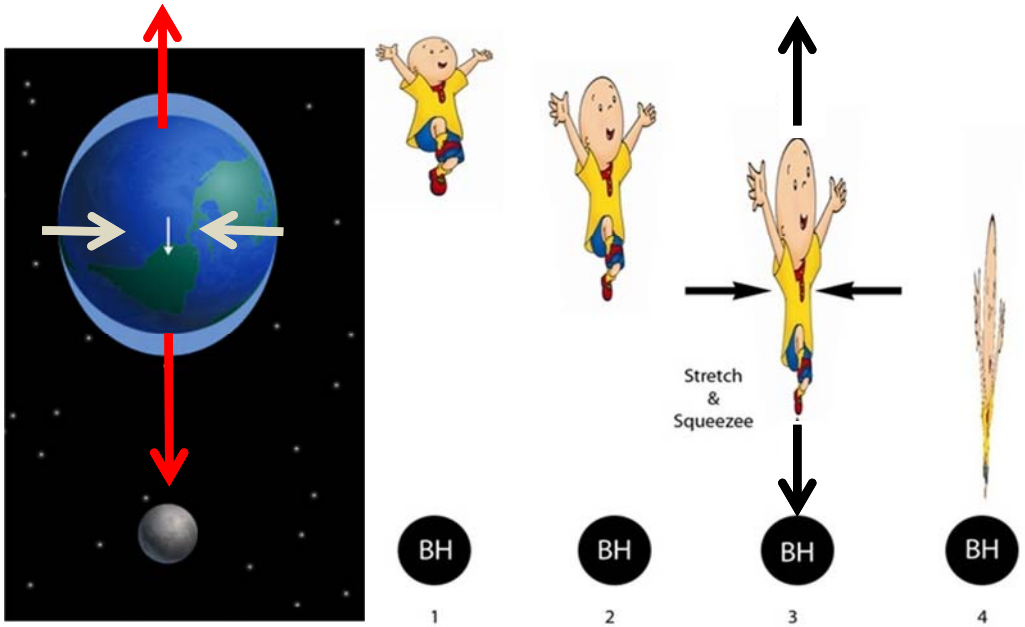
物理定律相同 (看起來的現象可能不同)

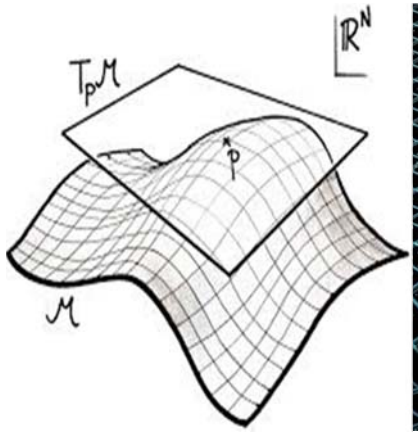
等效原理 (1907)：局部重力 = 加速度

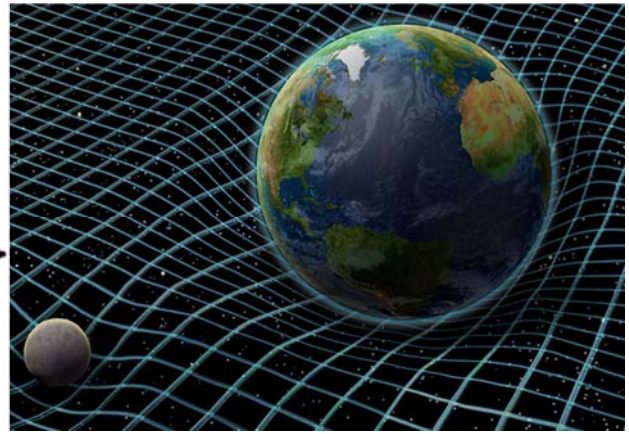
→ 光線受重力偏折



重力的效應：潮汐力

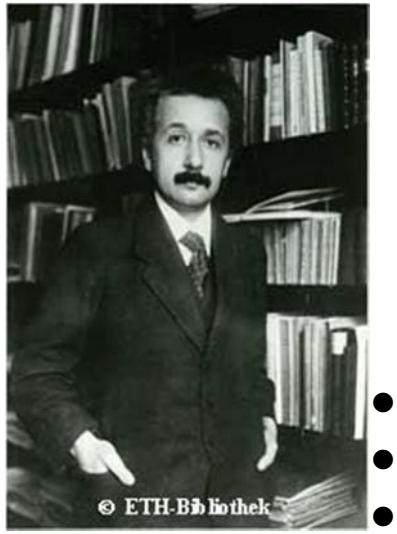






空間中的每一點(局部) 的重力，都可以想像成: 特定速度的座標系(例如: 在不同的加速的火箭上)。
整個空間是這些座標系的連結 → 形成彎曲空間
所以廣義相對論(重力)只是一個有關彎曲空間的理論。

廣義相對論 (1915)



(1916)

時空幾何
重力

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

物質分布

- 重力下的軌道：在彎曲時空裡的直線
- (重) 力傳播需要時間（因果律）
- 應用：GPS 定位 (修正衛星與地面時間差)

GPS error could be 10km/day

1922年北野丸號上的愛因斯坦夫婦

民國日報報道「恩斯坦」訪問上海

民國日報

舊歷壬戌年九月廿七日

●電賀林省長就任續誌

●韓復炎家屬暫緩赴甯

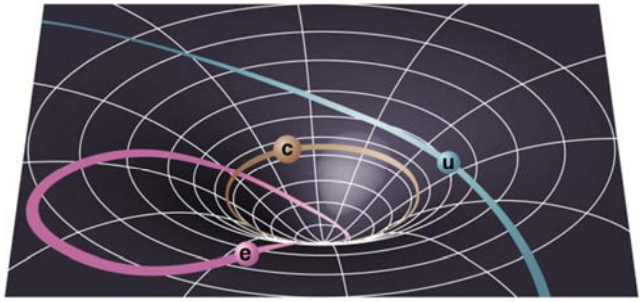
●恩斯坦博士來滬西訊

●苦恩施忠病自殺未遂

●書業續拒加郵費

愛因斯坦與愛爾莎在上海 - 時任上海大學校長于右任、著名畫家王一亭、前北大教授張君勱等人

廣相下的 “直線” 運動 : 測地線 (Geodesic)



GR 的直線 (測地線) 方程 →牛頓重力下的運動

$$\frac{d^2x^\beta}{d\tau^2}+\Gamma^\beta_{\mu\upsilon}\frac{dx^\mu}{d\tau}\frac{dx^\upsilon}{d\tau}=0 \quad \rightarrow \quad \vec{F}_g = m\vec{a}$$

在重力的影響下 → “平行線” 距離改變 (Geodesic deviation)

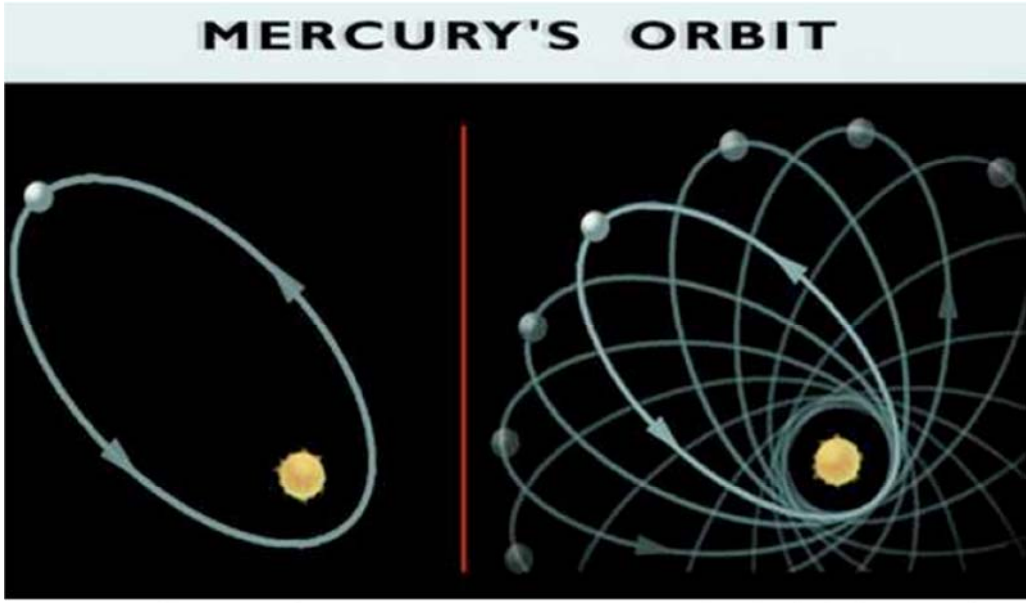
“drag-free control” →
確保衛星走在側地線上，不受重力以外的力影響，

微小的重力效應乃是檢驗廣義相對論的最大困難

$\Phi/C^2 = GM/RC^2$

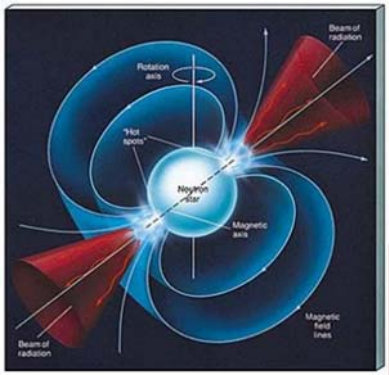
At surface of	a proton	$\Phi/C^2 = 10^{-39}$
	1m diam Tungsten sphere	$\Phi/C^2 = 10^{-23}$
	earth	$\Phi/C^2 = 7\times10^{-10}$
	sun	$\Phi/C^2 = 2\times10^{-6}$
	neutron star	$\Phi/C^2 = 0.15$
	black hole	$\Phi/C^2 = 1$

相對論預測水星在太陽重力場牽引下，每百年進動角43秒

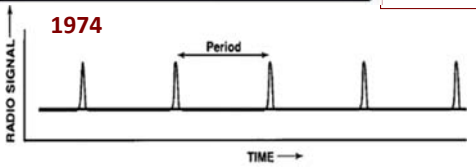


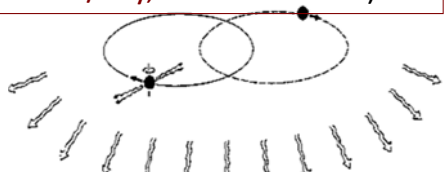
Newtonian gravity　　General relativistic gravity

Hulse-Taylor 脈衝雙星
(1993 Nobel prize)



period ： 59 ms
Spindown rate :-3ms / Myr
(1e-11 sec/day, ~原子鐘等級)





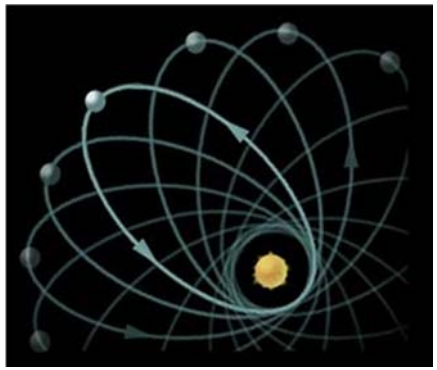
Taylor et al., 1978 → GW?

根據脈衝訊號反推 PSR1913+16 軌道參數

距離 ~5 倍地月距離
週期 ~8 小時
偏心率 ~0.617

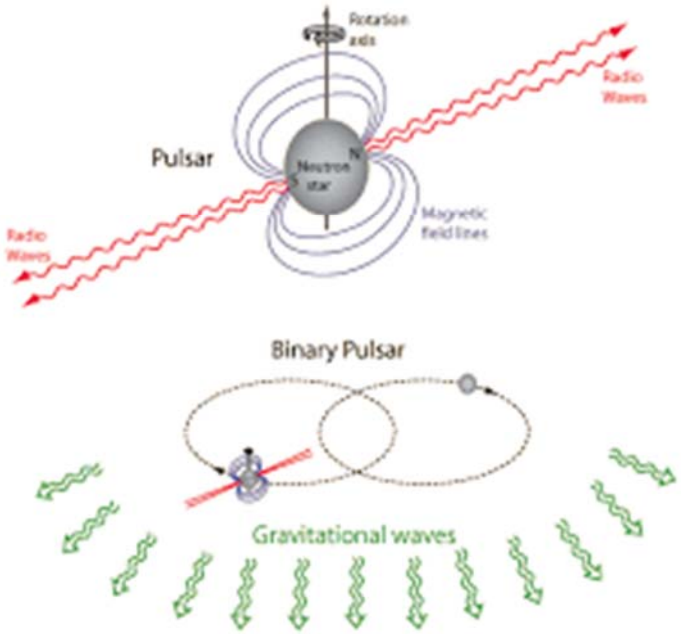
precession ~ 4 degs / yr
life time ~ 300 Myrs
M1 ~ M2 ~ 1.4 $M_\odot$

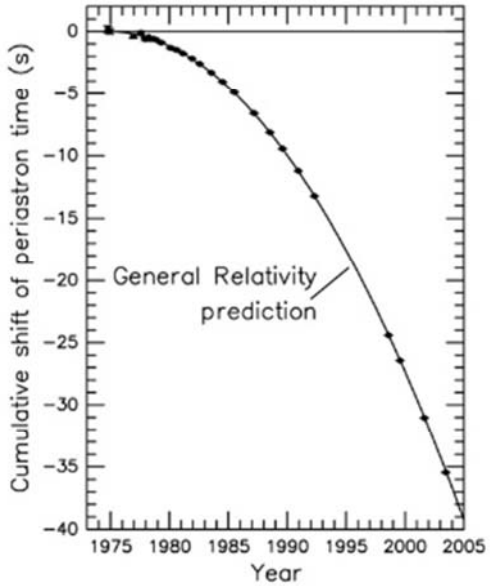
Δ period (P) ~ -75 us / yr
與GR預測吻合，
誤差<0.1%



比較水星的GR效應：
43'' / century

Binary Pulsars 因為重力輻射而導致軌道變慢





Orbital Decay was first detected in the Hulse-Taylor binary

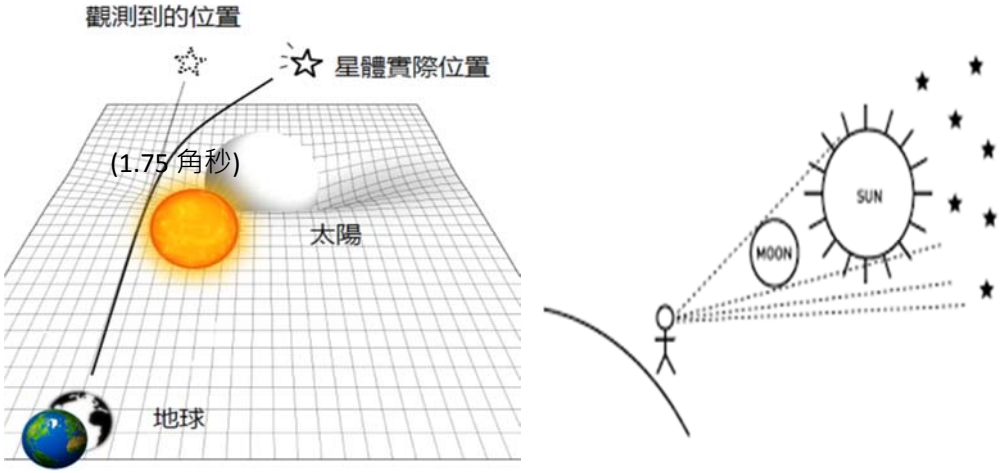
Rate is -2.4085(52) x 10^{-12} s/s. The agreement with GR prediction is perfect!

GR GIVES A SELF-CONSISTENT ESTIMATE FOR THE MASSES OF THE TWO COMPONENTS OF THE BINARY

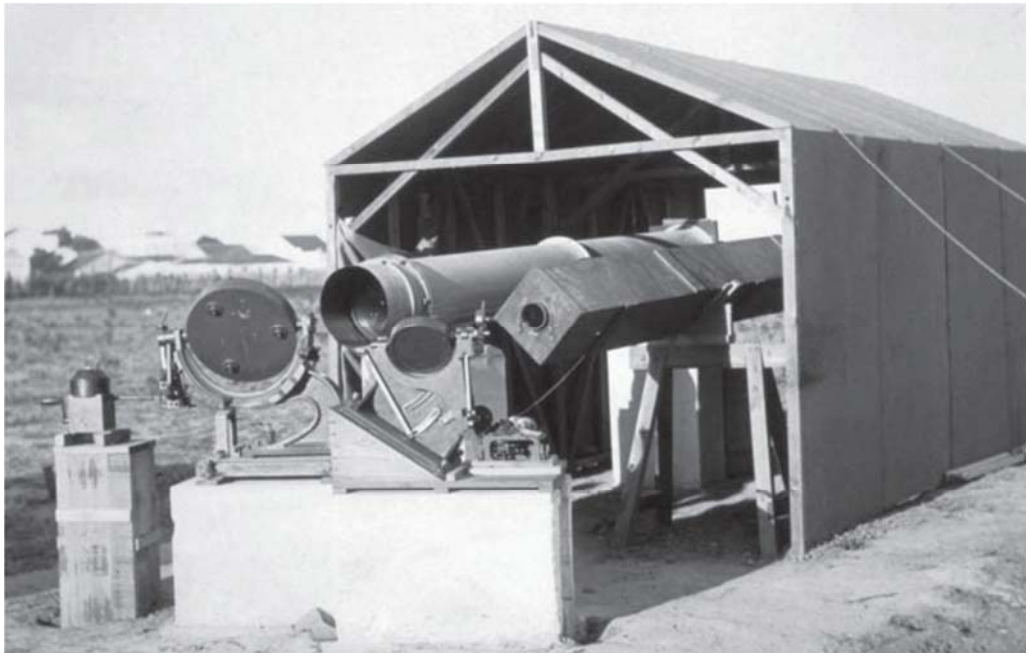
...but NOT the only one!!!
...and NOT the most precise!

Detected in 9 binary pulsars

星光會被太陽重力場偏転



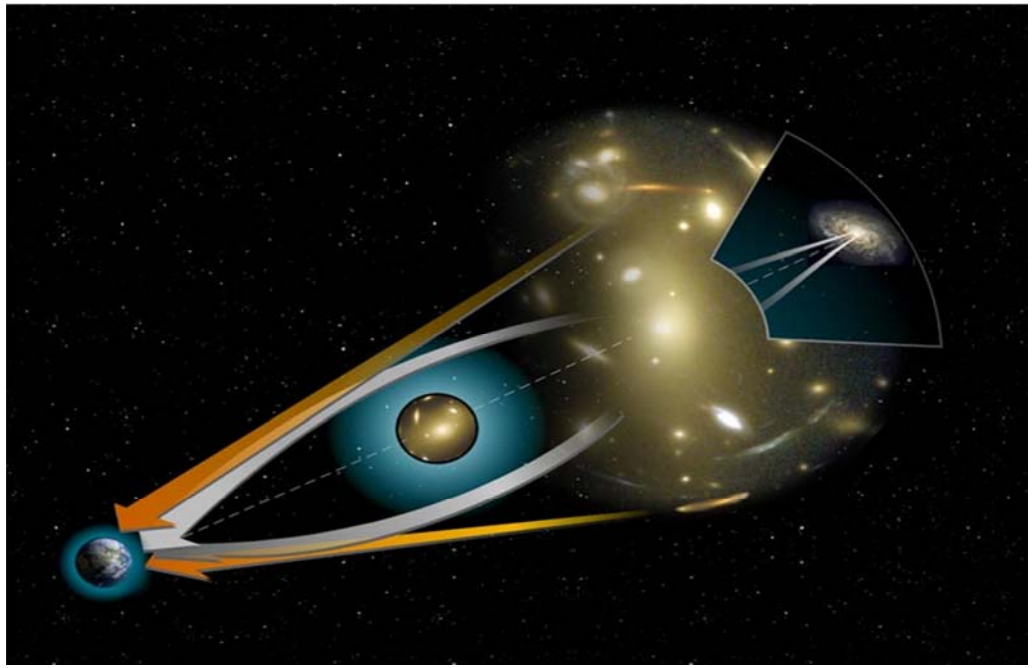
Eddington 爵士1919年所設計的觀察儀



愛因斯坦收藏的1919,5月29日
Eddington 在日蝕時量到的星光偏転底片

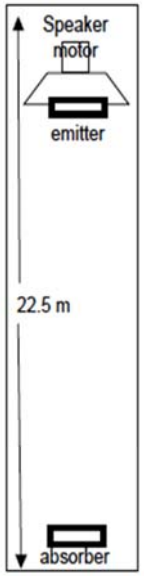
Eiddington's 1919 Telegram

重力透鏡



可以操控的精確測驗(1) - 1960, Pound-Rebka 實驗

Harvard's Jefferson Physical Laboratory – 22.5 meter tower.



Over this height the gravitational potential of the earth varies by 2.5×10^{-15} (gh/C^2)

To measure a relative frequency shift this small Pound needed to find an EM transition of narrow line width

The 14kev γ ray transition in Fe 57

Natural Lifetime $\tau = \sim10^{-7}$ sec

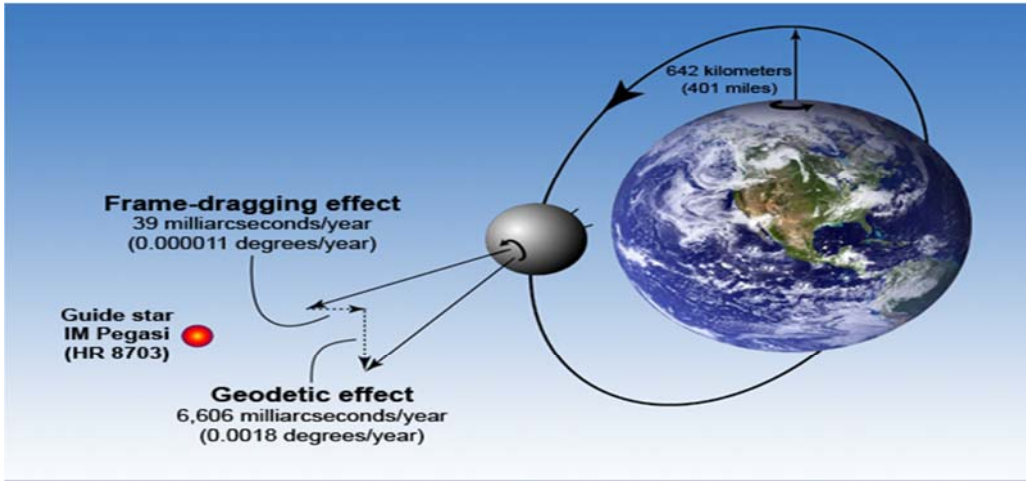
Natural Linewidth $\Gamma = h/\tau = 10^{-8}$ eV

→ a fractional FWHM $\Gamma/E = 1\times10^{-12}$

divide line by recoil free resonant absorption: Mössbauer Effect

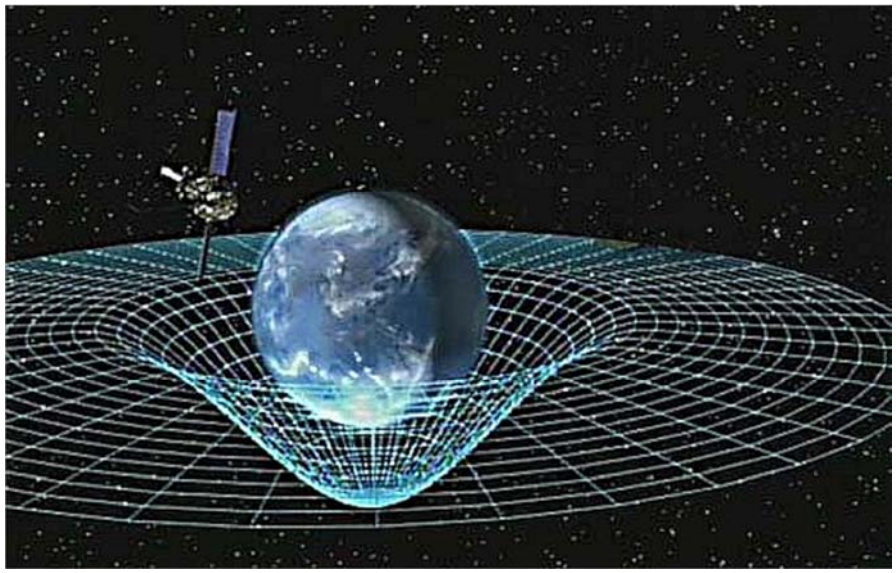
Pound and Rebka measured $2\Delta\nu = (5.13 \pm 0.51) \times 10^{-15}$ a result good to 10%

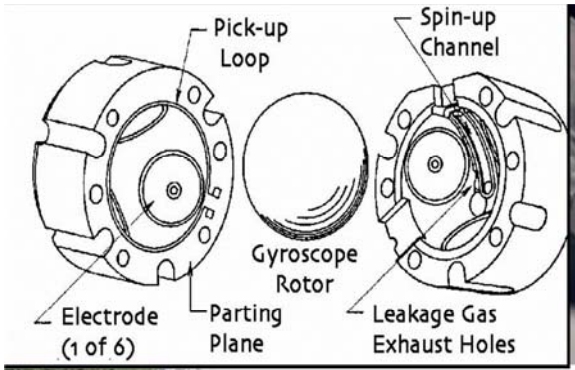
可以操控的精確測驗(2)- Gravity Probe B



	Measured	Predicted
Geodetic precession (mas)	6602 ± 18	6606
Frame-dragging (mas)	37.2 ± 7.2	39.2

地球重力場中的重力探測器B
2004年4月19日衛星運行時間持續17個月。任務的費用總共為US$7.5億元



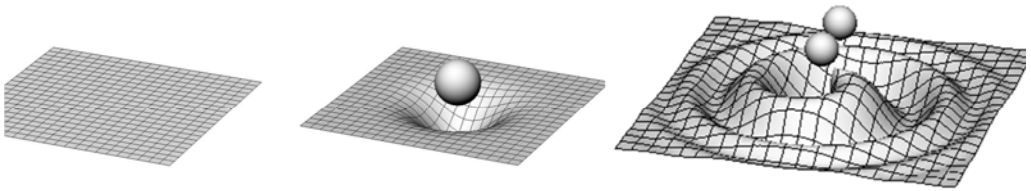


- 嚴格来說，以上的測驗並未真正的檢驗廣義相對論，而只是偵測了空間的可彎曲性(變形，如流體黏度)的貢獻，要真正的測驗廣義相對論，就要偵測到重力波，因為廣義相對論是一個以時空度規為動力變量的理論，而重力波就是時空度規的變化。所以要確切檢定廣義相對論的動力性質就必須要測量重力波的諸多性質。

- 另外，以上的測驗都不是測驗理論的非綫性性質及强塲的部分。

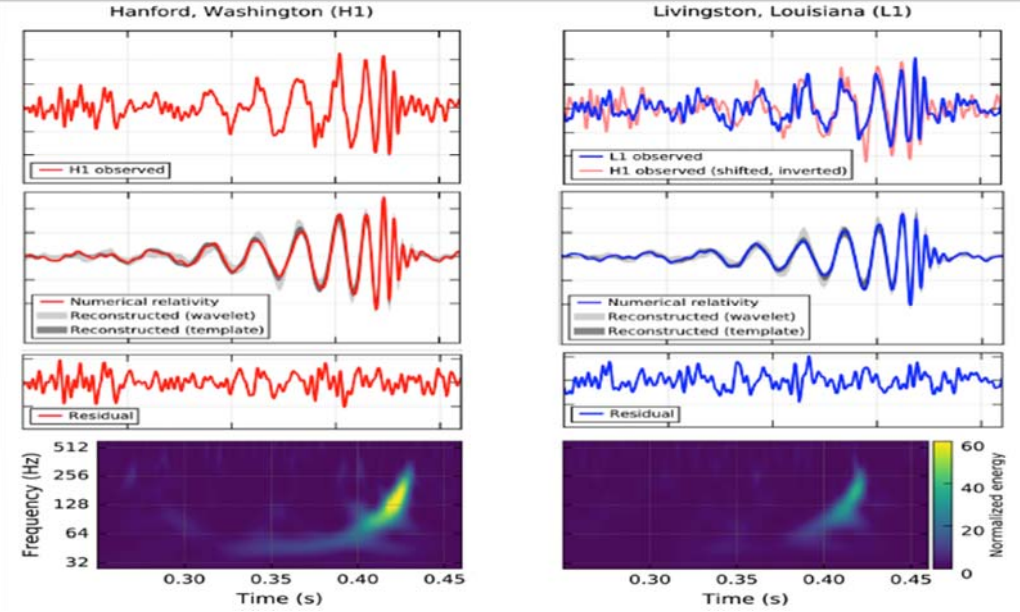
- 測量重力波是人類要邁進波瀾壯闊的宇宙空間的開始。

重力波 - 時空曲率(度規) 的擾動



- “觀測” 黑洞、中子星碰撞
- 重力波傳播不受干擾→ 宇宙誕生瞬間 (大霹靂) 的訊息

第一個重力波訊號 GW150914 (2015年9月14日；11:50:45(CET))



(1) 發生在與地球的距離約413±6億光年的位置，相應的紅移為0.09+0.03−0.04。

(2) 依據對紅移數據的分析，該重力波是由兩個質量分別為36+5−4倍太陽質量和29±4倍太陽質量的黑洞併合放出的，而併合後的黑洞的質量為太陽的62±4倍。其間減少的3.0±0.5倍太陽質量的能量以重力波形式釋出，符合質能等價。

(3) 重力波輻射的峰值功率為3.6×1049W，是可觀測宇宙所有可見光源功率總和的10倍多。

(4) 測信號持續的0.2秒內。

(5) 黑洞間相對切向速度由光速的30%增至60%。它們的軌道運動頻率為75Hz，約為重力波頻率的一半。

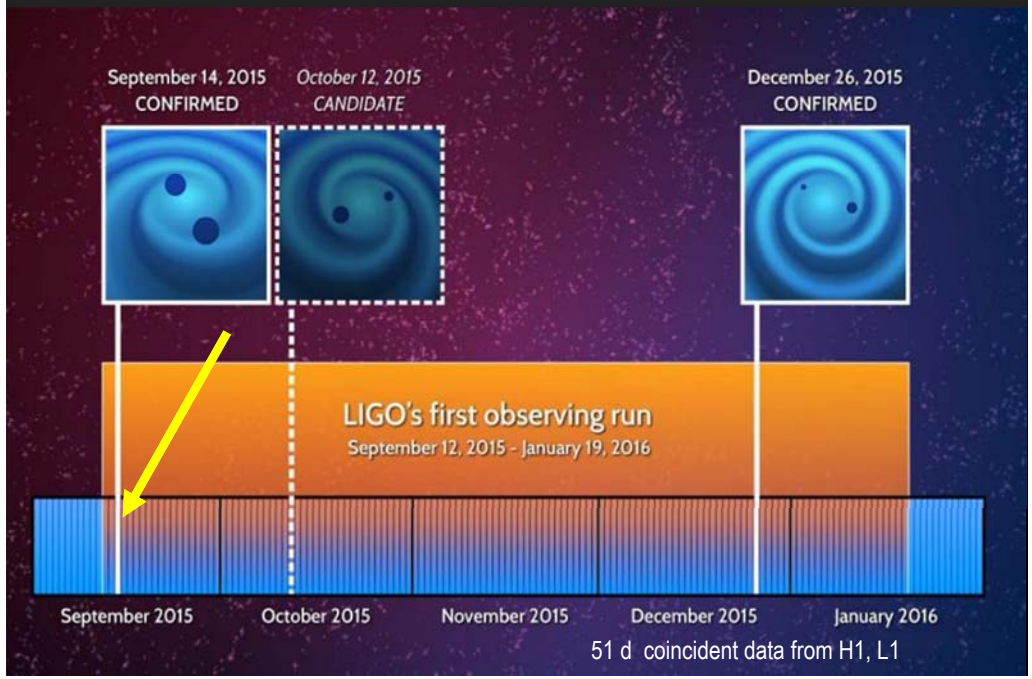
(6) 在兩個黑洞併合前，它們的距離僅為350km。

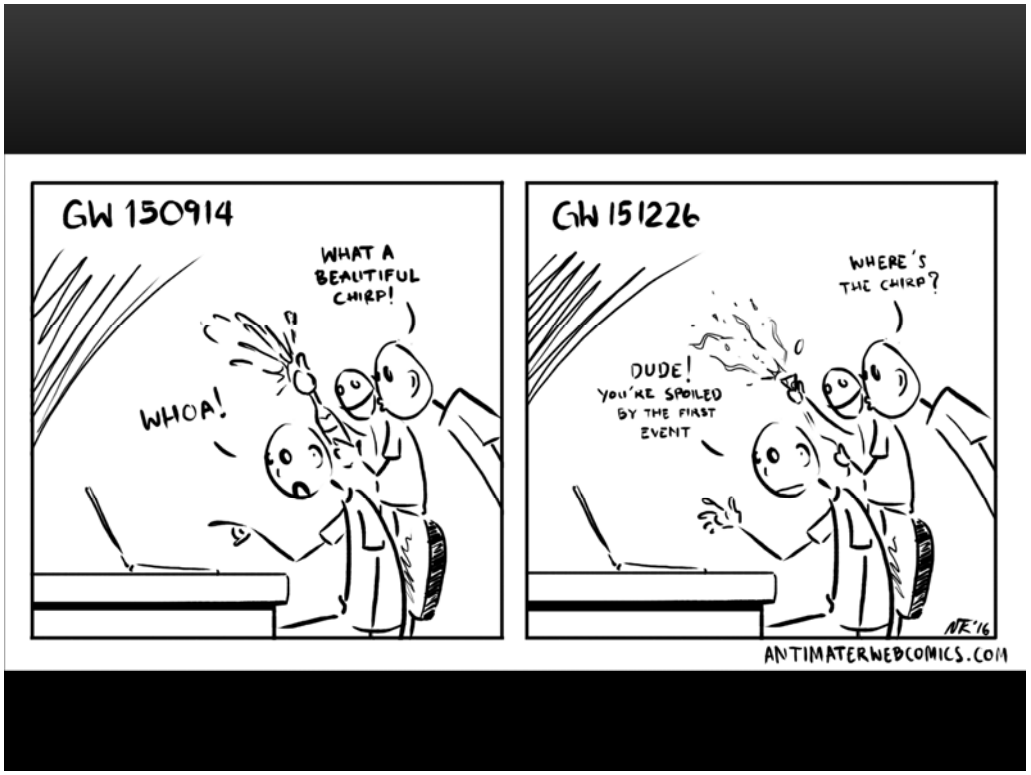
(7) 這一相對極小的軌道半徑意味著所觀測的系統只能是黑洞已知的系統中，沒有其他系統的質量能夠讓其在併合前以如此小的半徑做軌道運動。黑洞-中子星的軌道運動頻率在併合前會更低。已觀測到的中子星中，質量最大的中子星的質量為太陽2倍。穩定中子星的質量上限為3倍太陽質量，因而中子星對的質量並不足以形成GW150914中的併合情形，除非它們是夸克星這樣的怪異天體。

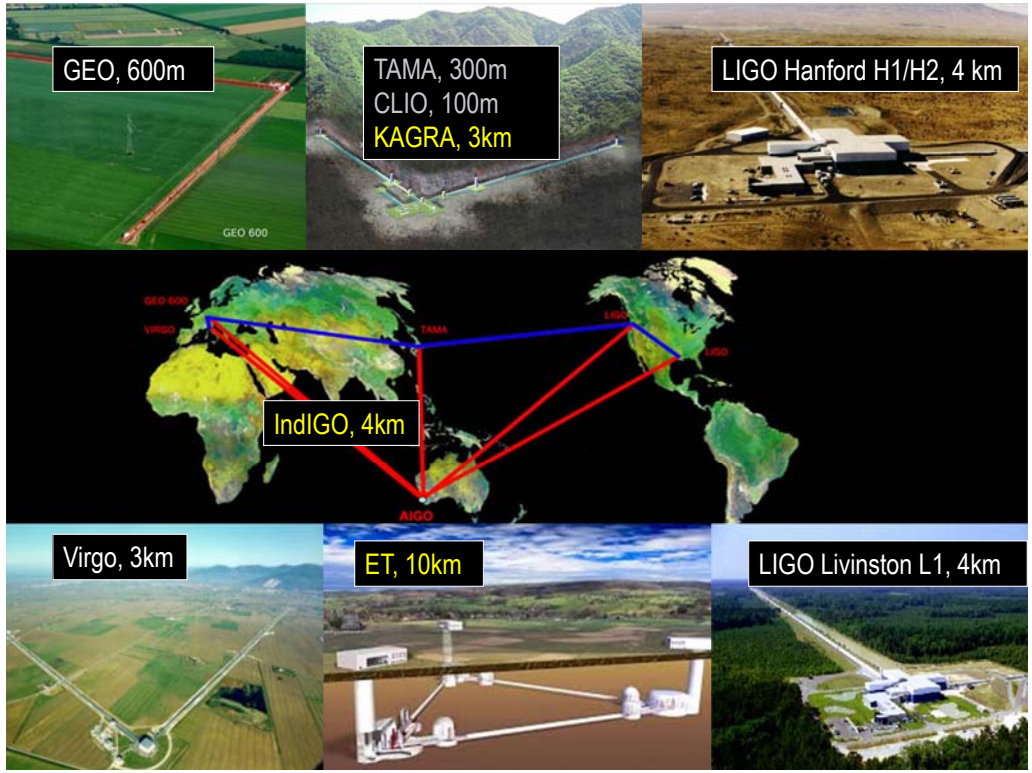
(8) 重力波在高峰後衰減振盪，黑洞也隨之進入併合的最終階段。儘管後牛頓力學近似方法已經可以給出旋近運動的較為完善的描述，但強重力場併合階段只能通過大尺度相對論數值模擬得到普遍解。

(9) 併合後得到的黑洞是一個轉動的克爾黑洞。其自轉參數為0.67，即其角動量為對應於質量的最大取值的2/3

LIGO O1 (第一期觀測結果)

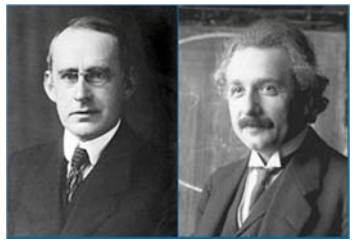


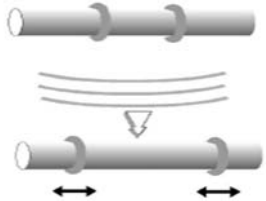




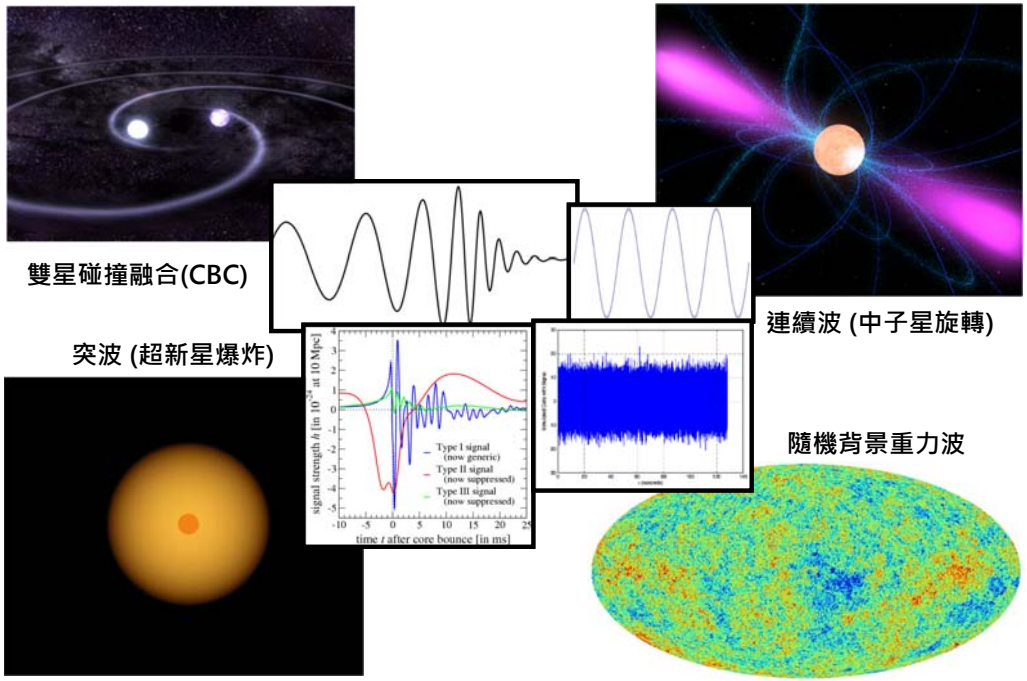
早期重力波研究：猜想→否定→嘗試

1776	Laplace 提出重力的有限速度傳遞
1908	Poincare 提出重力波概念解釋水星進動
1916	Einstein 以線性化理論推導出波方程
1922	Eddington 認為重力波只是座標的效應
1936	Einstein 與 Rosen 推導重力平面波解存在奇點，因此不應存在 (發表到PR的文章被退回*)
1938	Einstein, Infeld and Hoffman 以 “後牛頓近似” 討論慢速系統
1950’s	Pirane, Feymann 以想像實驗說明重力輻射
1969	Weber 宣稱偵測到重力波
1970	Burke and Thorne 推導雙星重力輻射 (四極距公式)
1975	休斯與泰勒發現脈衝雙星 PSR 1913+16

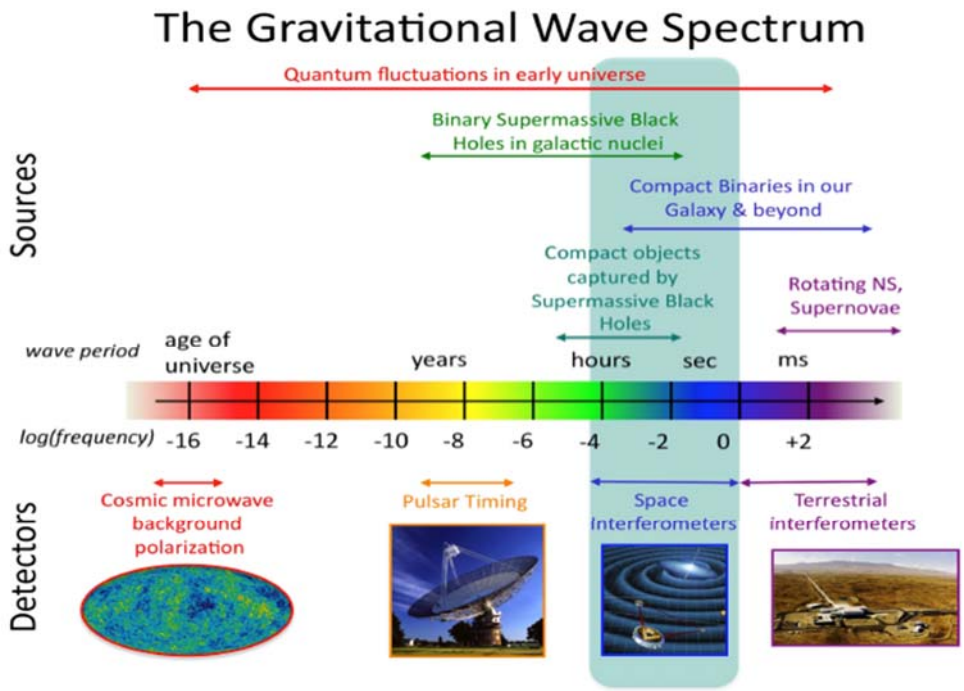




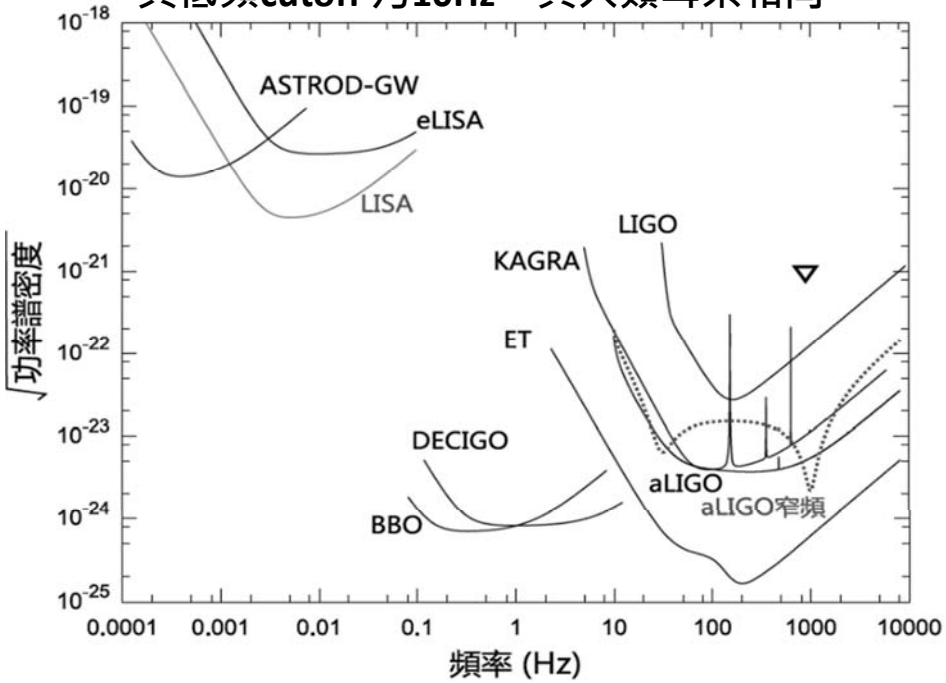
四種重力波型態



天文的重力波頻譜

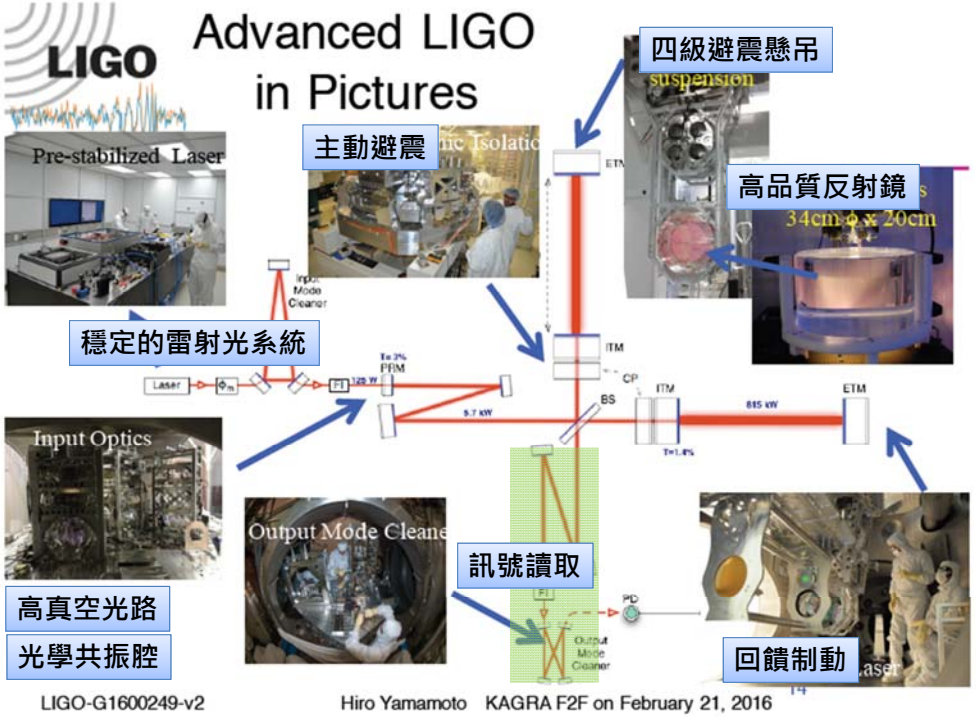


主要的重力波干涉儀靈敏度曲線
其低頻cutoff 乃10Hz，與人類耳朵相同



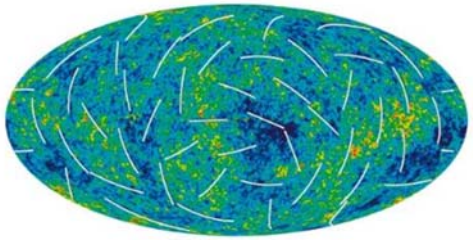
Weber bar (1968)

aluminium cylinders
D=1m, L=2m
1660 Hz
h ~ 1e-16

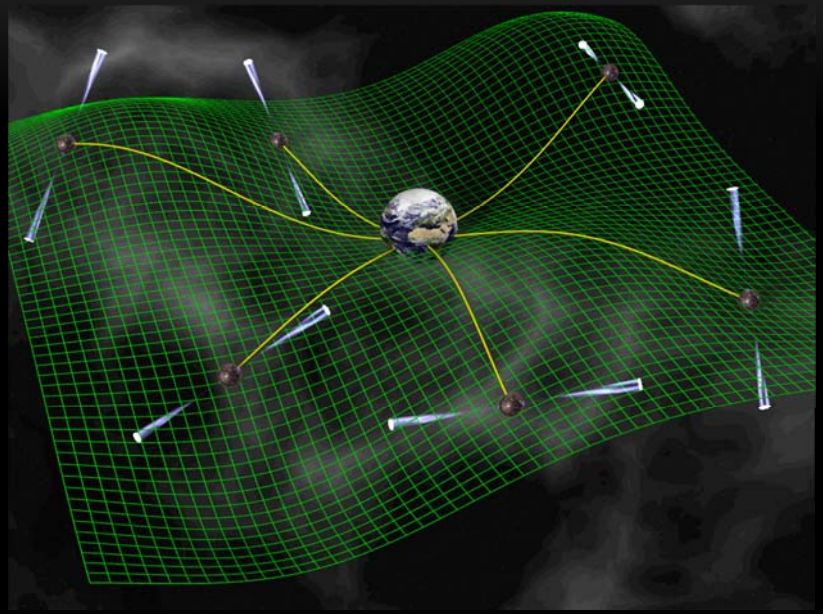


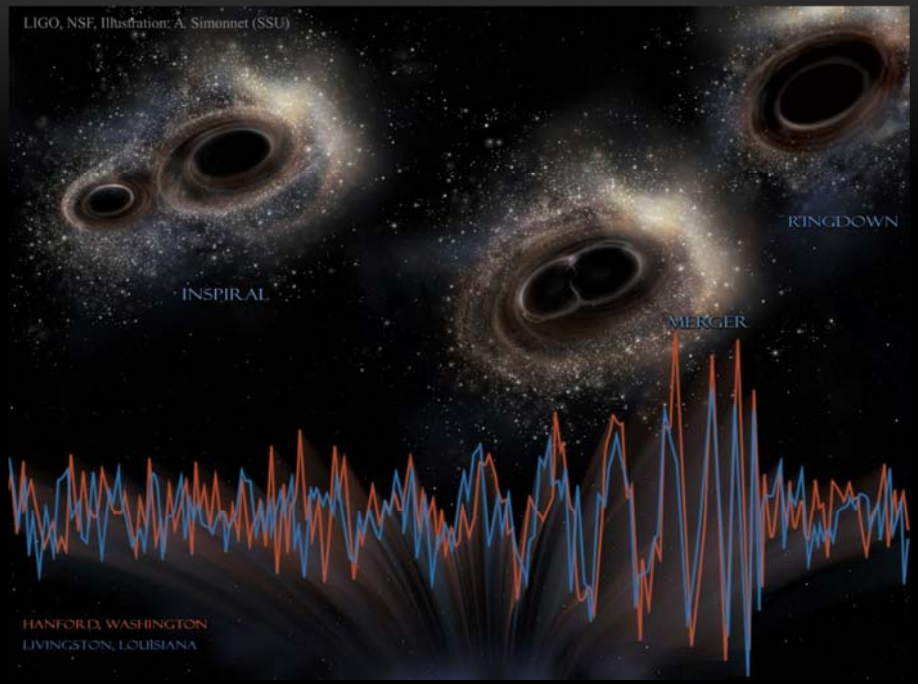
重力波觀測的應用

- 廣義相對論的強場測試
- 天文物理學
  - 距離測量 (~ Gpc)
  - 緻密雙星，黑洞、中子星等的性質 (如分布，組成等)
  - 其它高能天文現象
- 一窺早期宇宙的訊息：宇宙暴漲

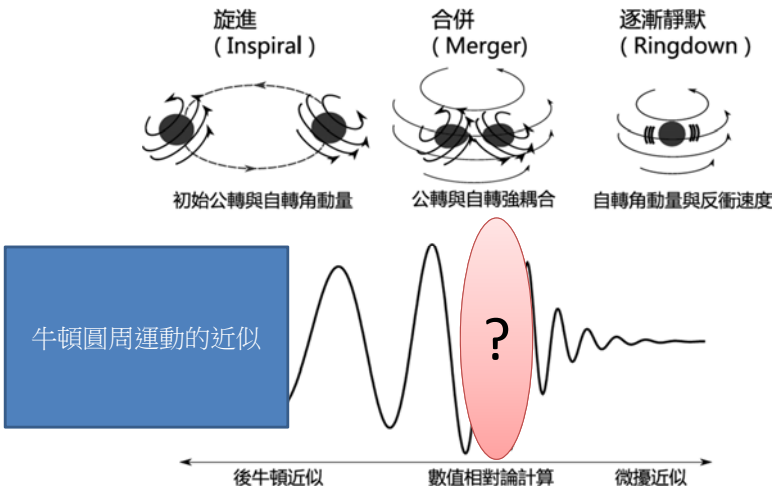


脈衝星計時 (Pulsar timing)



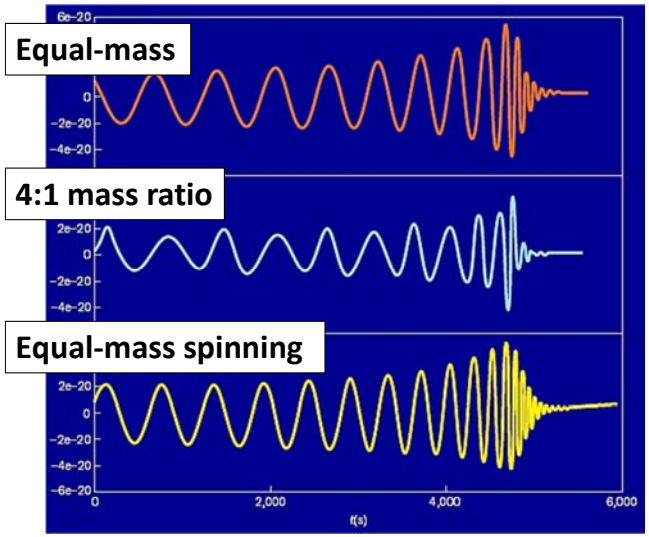


緻密雙星碰撞波形



- 2005年才成功模擬完整雙黑洞碰撞波形
- 重力波輻射 3% 質量與 15% 角動量，最終自旋 ~ 0.68

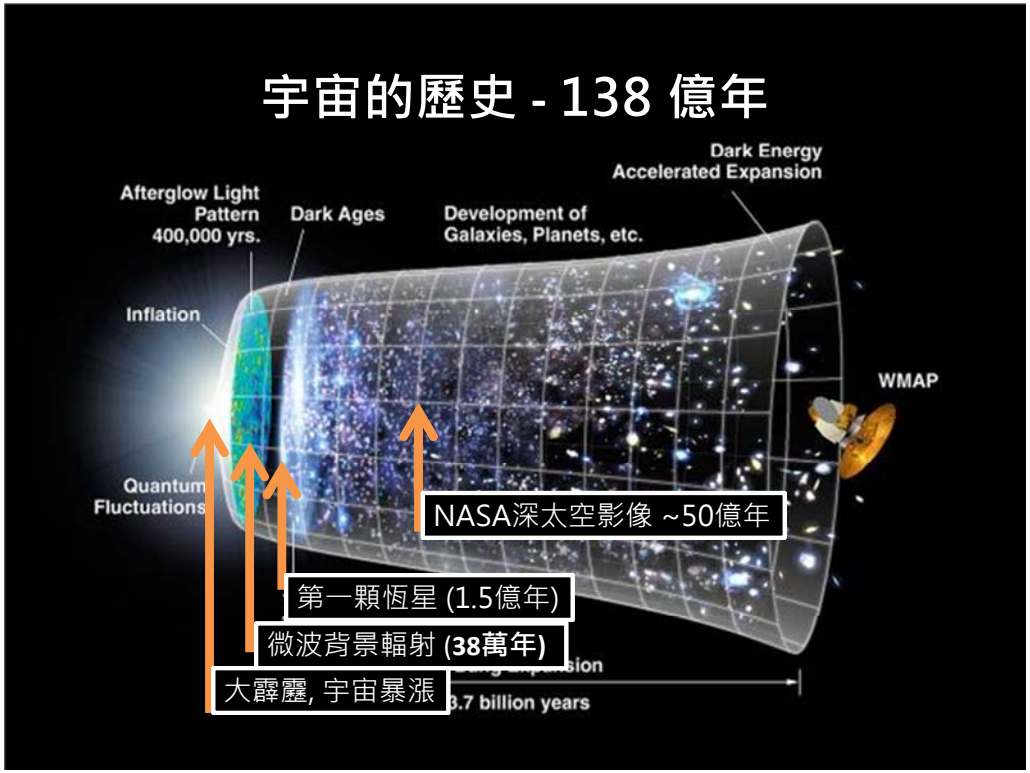
重力波天文學



重力波 Multi-messenger 天文學

- 由重力波所觸發的後續訊號 (Triggering)
  - Gamma-ray : 中子星
  - 超新星爆炸的微中子 (Neutrino)
  - X-ray : neutron star oscillation
- 由電磁觀測回頭找重力波 (Follow-up)
  - “Short” gamma-ray burst
  - Afterglow of electromagnetic wave

- 藉由電磁波段觀測來減少所需的參數空間



總結

- 首次的雙黑洞碰撞重力波的直接觀測，預示了人類以精密測量、與全然不同於電磁波的眼光來探索宇宙。開啟宇宙觀測的新一扇窗。
- 相比於電磁波的預測(Maxwell, 1864)、發現(Hertz, 1887)、與實際跨洋通訊(1901)，重力波的發現顯然艱辛多了。
- 來自深空的強烈重力波訊號將是常態，並將成為天文學上重要的觀測手段。協同現有的觀測，拼湊出宇宙深處早期的現象，一窺大爆炸之初。這可能是最宏觀的物理學挑戰了。
- 人類的進步必需源自協力合作，LIGO的成就乃是協力合作的結果，也啟示了人類必需協力合作才能在未來的日子的中取得進步。
- 當然相對論不會是，也不應該是描述宇宙的最終理論。
- 愛因斯坦終其一生並不相信黑洞及重力波的存在，或許他內心深處並不希望目睹其深愛的寶貝被取代吧！
- 另外，反諷的是愛因斯坦其中的一個出發點乃希望實現馬克原理建立一個關於慣性質量的重力理論，然而因爲等効果原理之故，慣性質量並不出現在他的方程式中！
- 未來的諸多挑戰就要看我們年輕的一代要如何回應了！

謝謝

從哥白尼到哈伯

李精益

文藻外語大學通識教育中心

時間：105年10月22日

地點：東吳大學物理學系

Email：polanyi.lee@gmail.com

《圖解天文學史》
蕭耐園　宣煥燦　編著
南京大學出版社

世界天文學史從宏觀上可以劃分為三個時期：

第一時期　古代天文學史

遠古 至 16世紀中葉

哥白尼提出日心說

第二時期　近代天文學史

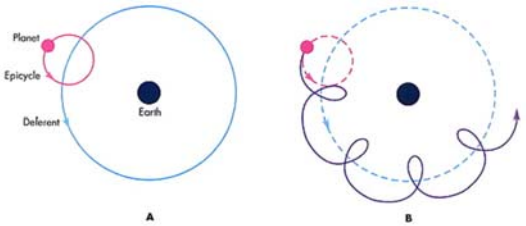
16世紀中葉 至 19世紀中葉

天體物理學誕生

第三時期　現代天文學史

19世紀中葉 至 今

2005年火星逆行



本輪—均輪體系

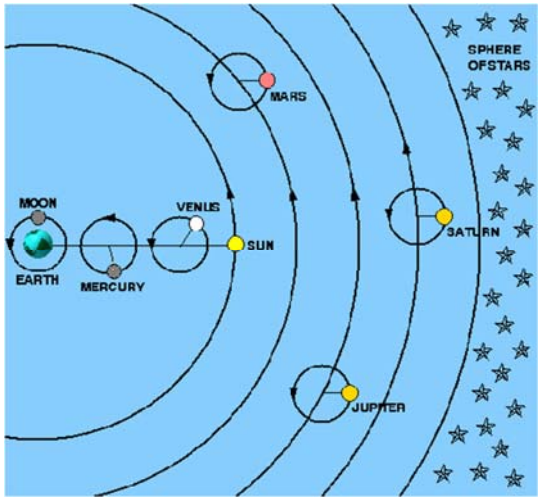
古希臘天文學的集大成者

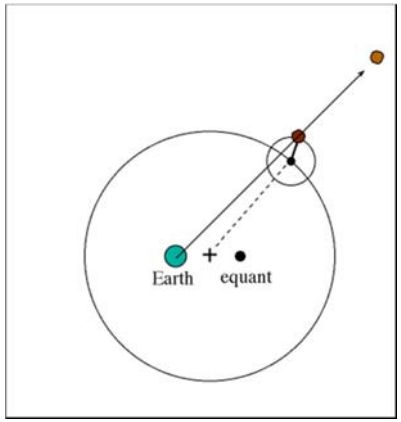
托勒密
(Ptolemy，約西元100-170)

著有《至大論》

托勒密體系

托勒密體系的兩個細節





equant：對點
[舊譯「偏心等距點」]

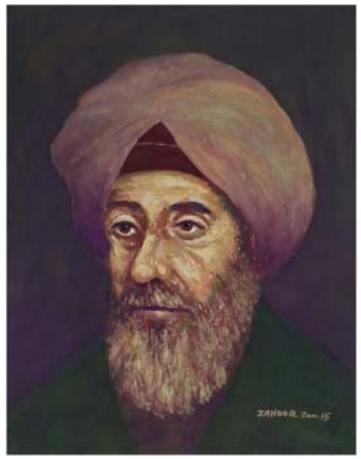
本輪和均輪的疊加，可以解釋行星的逆行、亮度的變化；
偏心點的引入，又進一步解釋了行星運動速度的不均勻性。

阿拉伯人對托勒密體系的發展

對《至大論》的翻譯提升了阿拉伯行星天文學的水平

10世紀的阿拉伯天文學文獻中不斷出現對托勒密的「懷疑」

阿爾哈曾(Alhazen，約965~約1040)提出了一個非托勒密的行星運動模型，這是第一個拒絕對點和偏心圓的幾何模型，並提出地球繞軸自轉的可能性。



馬拉蓋學派的反托勒密革命

馬拉蓋(Maraga)天文台　位於今伊朗北部　1259年始建

最後成功消除了托勒密體系中的偏心圓和對點、並提出替代行星運動模型的是馬拉蓋派的天文學家們。

圖西提出雙本輪設計　甚至構想過一種橢圓軌道的可能模型

施拉茲討論了日心體系的可能性

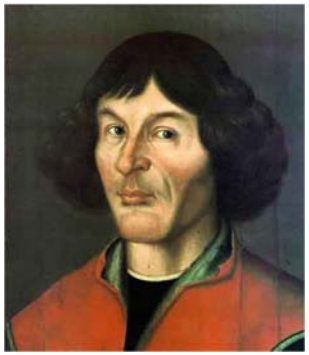
沙提爾的行星模型最終擺脫了托勒密體系的束縛，並且解決了托勒密體系中存在的嚴重問題。

哥白尼使用的日心模型等價於圖西在馬拉蓋天文台所發展的模型

人們相信沙提爾的模型被哥白尼改編進了他的日心模型

哥白尼開啟的革命

1543年，哥白尼出版《天球運行論》（*De revolutionibus orbium coelestium*，英譯*On the Revolutions of the Heavenly Spheres*；通譯《天體運行論》）。



哥白尼在《天球運行論》第一卷描繪了他的宇宙圖景如右：
最外層是恆星天

哥白尼沿襲了希臘人的看法，認為天空轉動著的是「天球」，所有的星星只不過附著在天球之上。

哥白尼承認托勒密體系對天體位置的預測是有效的，但違背了希臘天文學和哲學中的完美運動原理。
[在哥白尼之前，托勒密體系已發展到需要到八十多個「輪」；哥白尼體系共用了34個「輪」！]

嚴格地說，哥白尼體系並不是「日心」體系！
在具體描述和推算行星的運動時，哥白尼不得不引入偏心圓和本輪，因而太陽並非行星真正的繞轉中心。

日心說受到的責難一開始完全是科學和常識上的。首先人們懷疑，如果地球以如此大的速度運動，那必定會分崩離析。其次，有人質疑說，既然地球在運動，那地球上的物體為何沒有被拋在後面。最後，地球如果相對於恆星運動，應該可以觀察到恆星的周年視差（annual parallax），可實際上從來也沒有觀測到恆星視差。

《天球運行論》出版之後，只有少數學者接受哥白尼的學說，影響還很有限，並未構成對納入經院學派的托勒密學說的衝擊。

哥白尼的宇宙體系仍是一個有限的體系。

直到牛頓發現萬有引力定律之後，哥白尼體系才逐步為天文學家所公認。

哥白尼改進了行星運動學問題的解決，但是帶來了動力學上的新問題—是什麼原因使得行星、特別是地球運動起來的？在回答這些問題的過程中出現了四個關鍵人物：

第谷
主要貢獻在於給出了精確和完備的觀測

克卜勒
將天文學從幾何學的應用轉換成物理動力學的一支

伽利略
利用望遠鏡揭示了天體隱藏著的真相，並且發展了運動的新概念，鞏固了哥白尼的主張

笛卡兒
構想了一個無限的宇宙，在其中沒有什麼位置和方向是特殊的，太陽只不過是我們的區域性恆星而已。

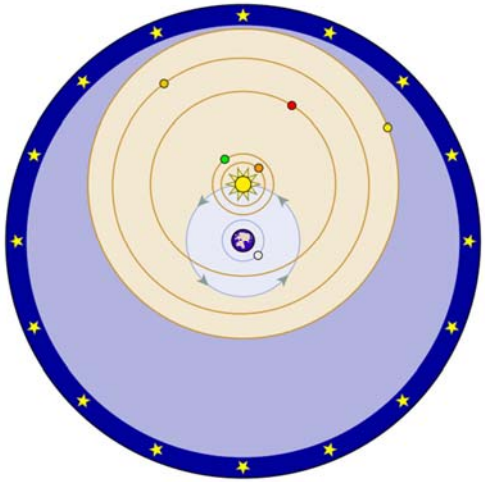
第谷的精密天文學

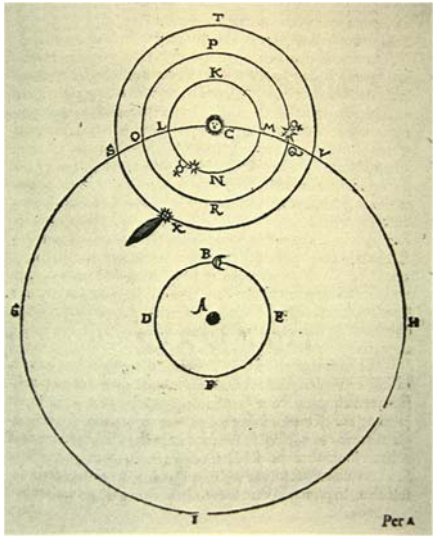
1572年11月，仙后座出現「新星」，第谷對它進行的詳細觀察表明：它在月亮上面很遠的地方，所以是天體。

1577年，天空出現大彗星，第谷的觀察表明它是天體，它位於行星際空間；然而如果是這樣，它就是正在毫不費力地穿過被認為攜帶著行星繞著中心地球運動的那些看不見的天球層。這使得第谷徹底明白：天球實際上根本不存在！行星是在軌道上獨立運行著的天體，要解釋行星的運動原因是很困難的。結果為了給出一個答案，天文學家不得不從運動學轉向動力學，從幾何學轉向物理學。

第谷一直致力於儀器和觀測技術的基本改革。
丹麥國王Frederic Ⅱ專門撥鉅款為他在汶島（Hven I.）上修建了一個天文臺。這是近代第一個真正的天文臺，於1580年落成。

第谷不贊成托勒密的地心說，也不接受哥白尼的日心說，提出了後來稱為「第谷體系」的宇宙模型。





第谷書中把彗星看成是繞太陽運行的真實天體。

克卜勒和行星運動定律

哥白尼體系執著地堅持希臘古典的正圓運動觀念，因此不得不繼續沿用本輪–均輪組合法，以獲得與觀測現象的相符。唯有克卜勒徹底拋棄了正圓運動的概念，才確立了太陽系的概念。

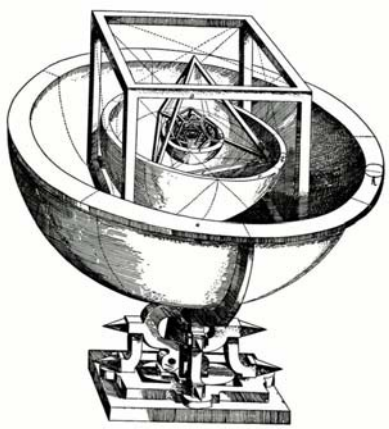
克卜勒能取得突破性成就，得力於三大遺產：哥白尼的日心體系、第谷的精確觀測資料、吉爾伯特在《論磁》中表達的地球是一個磁體的想法。

兩大偉人的攜手

克卜勒的主要工作：

1596年出版《宇宙的奧秘》

1609年，發表《以對火星運動的評論表達的新天文學或天空物理學》（此書有時被稱作《新天文學》〔*Astronomia nova*〕，有時被稱作《論火星的運動》），闡述了他對火星運動規律的發現：火星劃出一個以太陽為焦點的橢圓（即克卜勒第一定律）；由太陽到火星的矢徑在相等的時間內畫出相等的面積（即克卜勒第二定律）。



克卜勒在《宇宙的神秘》中提出的宇宙模型

1618年，克卜勒出版《哥白尼天文學概論》（*Epitome astronomia Copernicanae*），將他已經發現的火星運動兩大定律推廣到了太陽系的所有行星。

1619年，克卜勒在《世界的和諧》這本書中公佈了他所發現的第三定律。

1627年出版《魯道夫星表》

這是當時最完備最準確的一部星表，在以後的一百多年裏幾乎無修改地被天文學家和航海家尊為經典。

《魯道夫星表》扉頁

伽利略：望遠鏡天文學的開創者
日心地動說的捍衛者

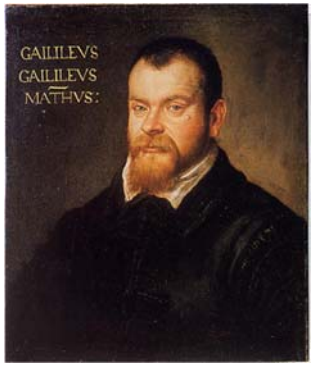
伽利略在兩個層面上展開對哥白尼學說的支持：

以透過望遠鏡做出的天文發現支持哥白尼學說

經由重新評價運動的概念，反駁了對地動說的經典駁難，從物理上支持哥白尼學說。

伽利略1610年以前的早期工作主要在動力學方面。　伽利略學生時代就對亞里斯多德的運動理論深表懷疑。　伽利略在力學上的一系列開創性工作，十分有利於他捍衛哥白尼學說。

伽利略很早就是一個哥白尼學說的信奉者

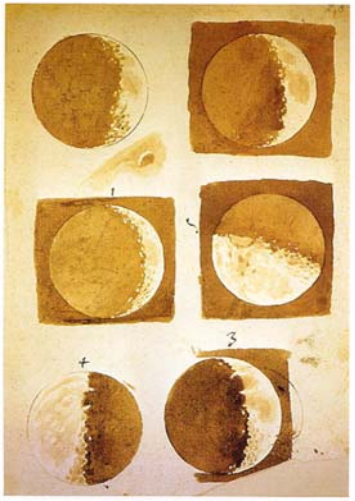


1609至1610年1月，伽利略將自製望遠鏡用於天文觀測並作出重大發現。1610年3月，伽利略將他的新發現寫成了《星界的報告》（*Sidereus Nuncius*，英譯通作*Sidereal Messenger*；中譯常作《星際信使》）一書，在書中報告了他用望遠鏡觀察到的新天象：


SIDEREVS
NVNCIVS
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens
vnicuique, præsertim verò
PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, quæ à
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
Patauini Gymnasij Publico Mathematico
PERSPICILLI
Nuper à se reperti beneficio sunt obseruata in LVNÆ FACIE, FIXIS IN-
NVMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,
Apprime verò in
QVATVOR PLANETIS
Circa IOVIS Stellam disparibus interuallis, atque periodis, celeri-
tate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vsque
diem cognitos, nouissimè Author depræ-
hendit primus; atque
MEDICEA SIDERA
NVNCVPANDOS DECREVIT.
VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M DC X.

（1）月面凹凸不平　月球非亞里斯多德宣稱的完美天體

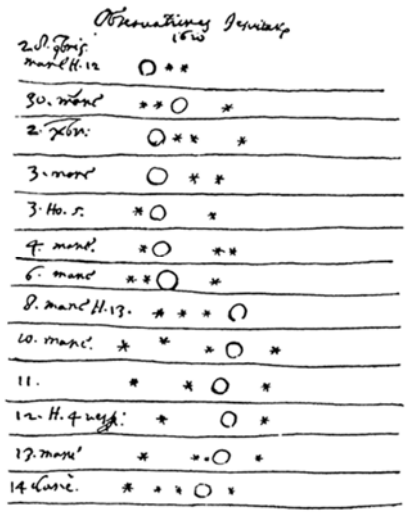
（2）透過望遠鏡看到的恆星遠比用肉眼直接看到的多得多。例：昴星團、銀河由無數星星構成



伽利略手繪的月面草圖

伽利略用望遠鏡看到的昴星團

（3）木星有四顆衛星

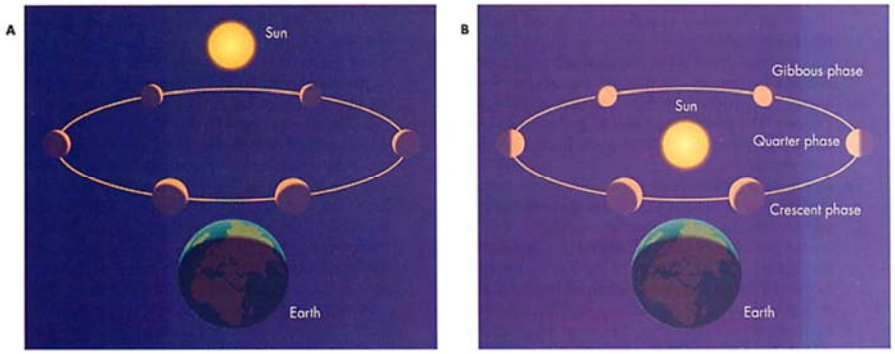


伽利略關於木星的觀察手稿

木星及伽利略衛星的照片

《星界的報告》在知識界引起了巨大的反響，人們爭相傳誦「哥倫布發現了新大陸，伽利略發現了新宇宙。」

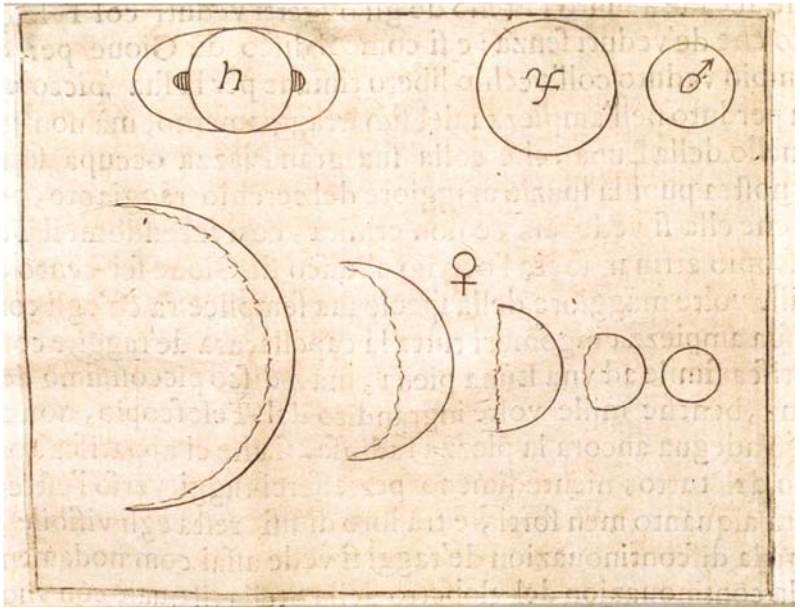
1610年9月底，伽利略發現金星存在位相變化



A：托勒密體系預測的金星位相

B：哥白尼體系預測的金星位相

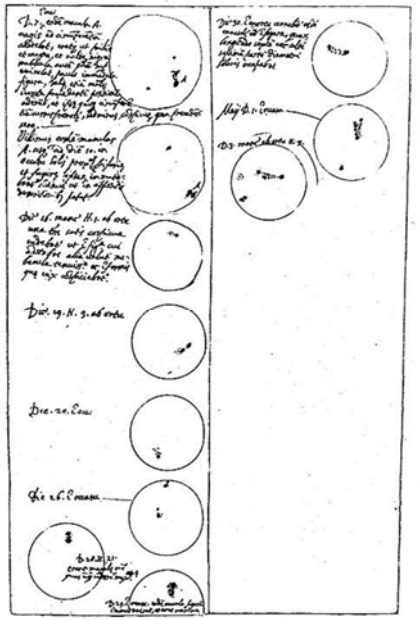
對日心說的有力支持！



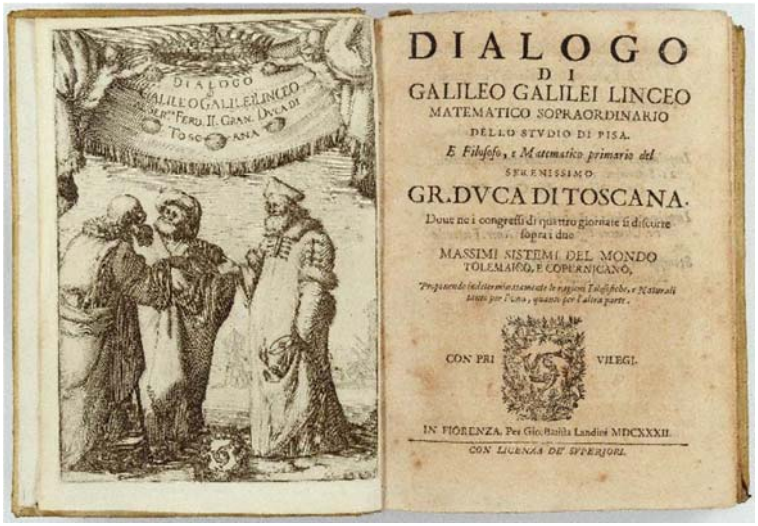
伽利略透過望遠鏡見到的土星、木星、火星、金星

1610年，伽利略用望遠鏡觀察太陽，發現了太陽黑子(sunspot)，並且從黑子的緩慢移動推斷太陽是在自轉，週期為25天。

1613年，他將這些發現寫在了《關於太陽黑子的信札》（*Lettere sulle macchie solari*）一書中，書中還談到了木星衛星的食問題。



1632年，伽利略出版《關於托勒密和哥白尼兩大世界體系的對話》（簡稱《對話》）。



《對話》用義大利方言寫成，對於哥白尼宇宙學的優點給出了精彩論述並且有望遠鏡的證據支持。

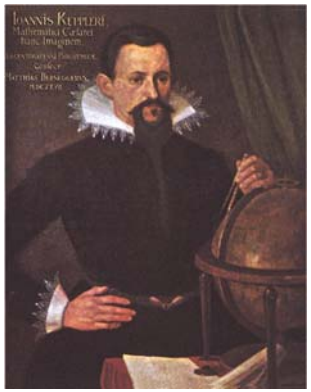
書中有三個人參與對話，對話分四天進行：

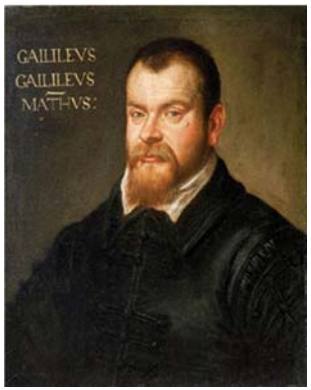
第一天論證了地球和行星一樣，是一個運動的天體，並批評了亞里斯多德自然哲學的基本原則，還討論了月亮表面的地貌特徵；

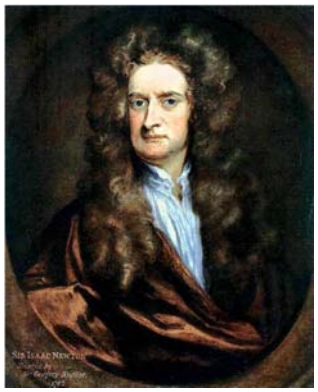
第二天以運動的相對性，反駁了對地球自轉的責難；

第三天討論了地球繞太陽的公轉；

第四天用地球的運動解釋潮汐。



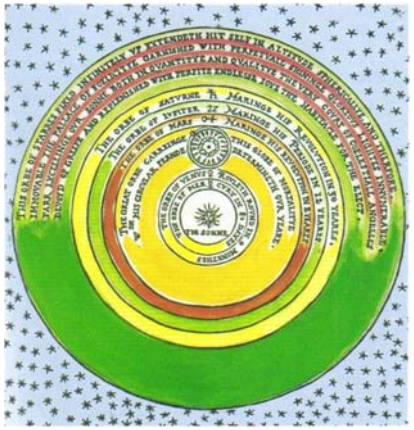




《對話》第三天的討論隻字沒有提到克卜勒的行星運動理論，這是令人感到惋惜的。行星的橢圓軌道沒有為伽利略採納。實際上，伽利略一直沒有能將他創造的新力學運用到天體運動中。他還是相信天體做完美的正圓運動，慣性運動只是在局部地域才是可能的，天體並不做慣性運動。將天上的力學與地上的力學相統一是牛頓的工作。

[插曲一]

對恆星天球的突破



英國哲學家迪吉斯（Thomas Digges，1546–1595）1576年發表了《天球運行的完整描述》一書。在該書中，迪吉斯宣稱恆星層可以向上無休止地延長，恆星不一定都處在同一球面上，有高有低，由於恆星距離人太遠故人眼覺察不出其高低的差別。有些星星較小是因為距離較遠，而大多數星星因距離太遠而不為我們所看見。迪吉斯實際上含糊地說出了宇宙的無邊性。但他是一個哥白尼主義者，還保留了恆星天層內的一切天球結構。

[插曲二]

布魯諾的無限宇宙

布魯諾（Giordano Bruno，1548~1600）發展了哥白尼的宇宙學說，提出了宇宙無限的思想。布魯諾認為，宇宙是統一的、物質的、無限的，太陽系之外還有無限多個世界。太陽並不靜止，也處在運動之中；太陽並不是宇宙的中心，無限的宇宙根本沒有中心。

布魯諾通過哲學思辨得出的宇宙無限性觀念，在思想史上具有無比的重要性。整個近代的宇宙論革命，就是從封閉的世界走向無限的宇宙。

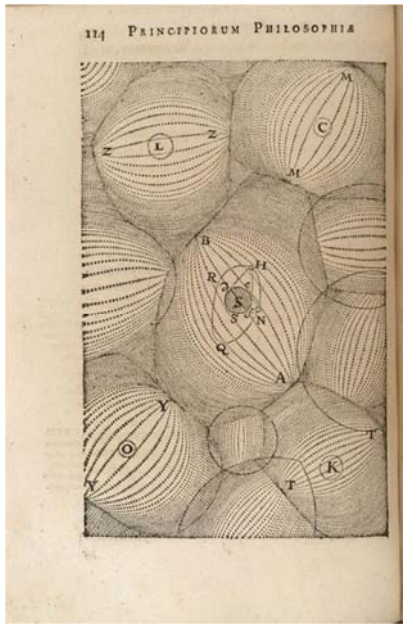
笛卡兒的無限宇宙

笛卡兒（ René Descartes ，1596~1650）打破了仍舊禁錮在哥白尼、伽利略和克卜勒等人腦袋裡的有限宇宙觀念，提出了無限宇宙的概念。

笛卡兒的宇宙是一個充滿物質的空間，這些充滿空間的物質的運動形成無數的漩渦。

笛卡兒的漩渦理論是第一個取代中世紀水晶球模型的宇宙學說，一度成為17世紀占主導地位的宇宙學說。

從哥白尼到笛卡兒的一個世紀中，天文學和天文學家研究的宇宙都發生了改變。幾十年內，天文學家已經懂得了重複和精確觀測的重要性，他們已經發現了如何設計儀器來擴展人類的感官。



笛卡兒書中呈現的漩渦理論

牛頓建立的框架

牛頓的主要工作

1665-6年

發明了級數近似法，得到二項式定理，發明了正流數運算法即微分運算，研究反流數運算即積分運算。

進行色散實驗

思考動力學和引力問題

1668年　發明反射望遠鏡

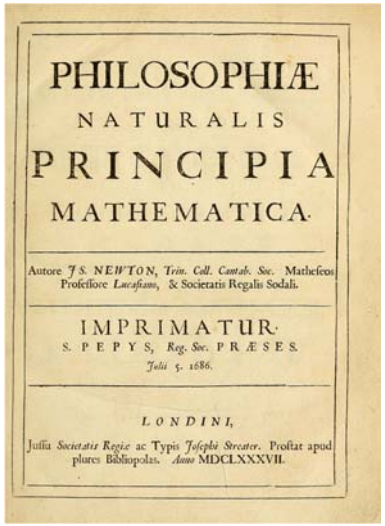
Isaac Newton (1643-1727)

1687年

出版《自然哲學的數學原理》（*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*；簡稱《原理》）

《原理》共分三篇，以及非常重要的導論。導論中對力學的各個基本概念作了定義，包括質量、動量、力等。牛頓是第一個精確使用這些概念的人。另外給出了絕對時間、絕對空間、絕對運動和絕對靜止的概念，並敘述了著名的牛頓運動三定律。

這一部分是牛頓對前人工作的一種空前的系統化，也是牛頓力學的概念框架。



《原理》第一篇名「物體的運動」，在做了必要的數學準備後，著重討論了在平方反比引力作用下兩個質點的運動規律；另解決了廣延物體的萬有引力如何取決於其形狀的問題。

《原理》第二篇名「物體在阻尼介質中的運動」，在這篇的結尾，牛頓批評了當時廣泛流行的笛卡兒的宇宙旋渦假說，認為行星在旋渦中的運動不可能符合克卜勒定律。

《原理》第三篇名「論宇宙體系」，主要論述了前兩篇給出的力學定律在天文學上的應用，是天體力學的開山之作。

《原理》開闢了一個全新的宇宙體系

牛頓力學的驗證之一：哈雷彗星

開拓南天觀測　「南天第谷」

促成《原理》的出版

預測「哈雷彗星」的回歸

1695年，哈雷注意到1531、1607和1682年出現的三顆彗星的彗星軌跡十分相似，研究後得出它們是同一顆彗星在不同時期的再現。　1705年出版《彗星天文學概論》，預言該彗星將於1758年再次回歸。當人們確實看到此彗星再次出現時，就將其命名為哈雷彗星。

Edmond Halley（1656–1742）

天體力學的早期發展

牛頓在《原理》中使用的是幾何學語言，現今大學所教的牛頓力學的代數形式是由一些數學家和天文學家在將牛頓力學用於天體運動時所發展起來的；這項改造工作由達朗貝爾、歐拉、拉格朗日、拉普拉斯、高斯等人所完成。

攝動理論是奠基時期天體力學最重要的分支

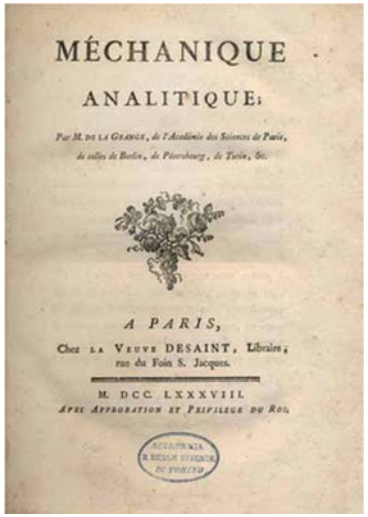
歐拉在研究木星和土星的相互攝動時首創根數變異法

月球運動理論

太陽系穩定性問題

（左）達朗貝爾
（右）歐拉

拉格朗日及其《分析力學》


MÉCHANIQUE
ANALITIQUE;
A PARIS,
Chez LA VEUVE DESAINT, Libraire,
rue du Foin S. Jacques.
M. DCC. LXXXVIII.
AVEC APPROBATION ET PRIVILEGE DU ROI.

天體力學的奠基作

1799–1825年，拉普拉斯出版了5卷16冊的巨著《天體力學》（ *Mécanique Céleste* ），總結了作者和同代人對天體運動研究的全部成果，堪稱天體力學的奠基作。


LES MÉTHODES NOUVELLES

MÉCANIQUE CÉLESTE

H. POINCARÉ.

TOME I.

PARIS.

高斯的貢獻

高斯用天體力學開創了一種用三次觀測確定運動軌道的計算方法，幫忙「找回穀神星」！

1809年，高斯出版《天體按照圓錐曲線運動的理論》，系統闡述他所提出的用多次觀測確定天體軌道的理論。

Carl Friedrich Gauss（1777–1855）

萬有引力定律的發現和天體力學的誕生使天文學從單純描述天體的幾何關係，進入到研究天體之間相互作用的階段；這是天文學發展史上的一次重大飛躍。

太陽系觀念的擴展和深化

太陽系觀念的形成和太陽系疆域的擴大

太陽系觀念的形成

哥白尼學說經布魯諾和伽利略等先驅者的宣傳，逐漸深入人心。布魯諾認為恆星分布於無限的空間中，太陽只是一顆普通的恆星。

克卜勒發展了哥白尼的日心學說，儘快他還沒有太陽系的明確觀念，可是向太陽系觀念的確立邁出了重要一步。

從牛頓始，人們才逐漸認識太陽吸引行星和彗星等天體，形成了一個天體系統。天體力學家們計算出行星繞太陽、衛星繞行星的軌道，正確描述了它們的運動，還研究了這個系統的穩定性問題。這樣便最終確立了太陽系的觀念。

提丟斯－波德定則的提出

1766年，J. D. Titius發現將下列一串數字：3、6 、12 、24 、48 、96，最前面添上0，再將每個 數字都加上4，然後各除以10，最後就得到：

0.4　0.7　1.0　1.6　2.8　5.2　10.0

Body	Titius-Bode Prediction	Observation
Mercury	(0 + 4)/10 = 0.4	0.39
Venus	(3 + 4)/10 = 0.7	0.72
Earth	(6 + 4)/10 = 1.0	1.0
Mars	(12 + 4)/10 = 1.6	1.52
???	(24 + 4)/10 = 2.8	2.77
Jupiter	(48 + 4) = 5.2	5.20
Saturn	(96 + 4) = 10.0	9.54
Uranus	(192 + 4) = 19.6	19.18
Neptune	???	30.06
Pluto	(384 + 4)/10 = 38.8	39.44

天王星的發現

1781年3-4月，赫歇爾意外發現天王星。新行星的發現使太陽系的疆界頓時擴大了一倍。

天王星與太陽的距離經測定為19.2天文單位，與提丟斯－波德定則預言的19.6天文單位驚人地相符！這一事實極大地鼓舞了在火星和木星之間搜尋新行星的人們。許多天文愛好者投身於這項工作，他們自稱為「天空巡警隊」，繼續追蹤這個「丟失的世界」。

William Herschel（1738–1822）

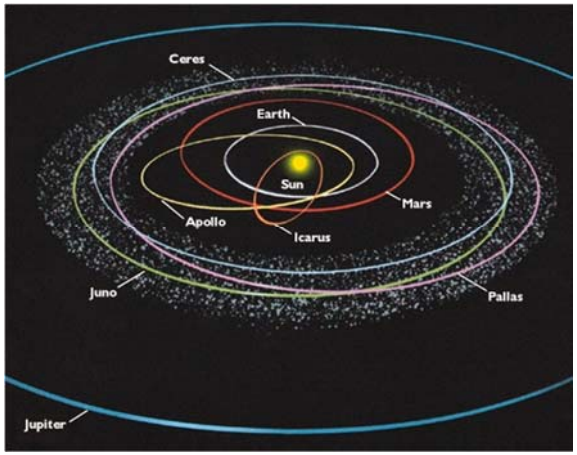
小行星的發現

就在人們熱火朝天地在天空尋找位於火星和木星軌道間的行星之際，1801年元旦夜，西西里天文學家皮亞齊在金牛座察覺到一個亮度暗弱的陌生星點。以後幾天的連續觀測發現它在恆星間移動，很可能是一顆新行星。

Giuseppe Piazzi
（1746–1826）

此星「丟失」後再由高斯幫忙尋回，皮亞齊為其取名Ceres，中譯為「穀神星」。穀神星與太陽的平均距離為2.77天文單位，與提丟斯－波德定則中的「空位」2.8天文單位相當吻合。美中不足的是穀神星僅是一顆小行星！

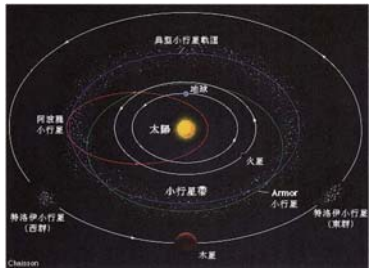
早期靠肉眼透過望遠鏡來發現小行星，極為艱辛且效率很低。1890年代，照相術開始成為搜尋小行星的利器。



小行星帶

Pallas：智行星　Juno：婚行星

穀行星、月球與地球



小行星分布概況

算出來的行星：海王星的發現

19世紀初，天文學家發現天王星位置的觀測值與理論值出現了偏差，且持續增大！

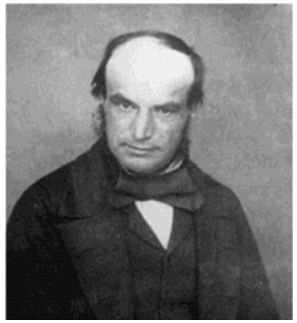
可能的解釋：天王星軌道之外還有一顆大行星！

「逆攝動」問題相當困難

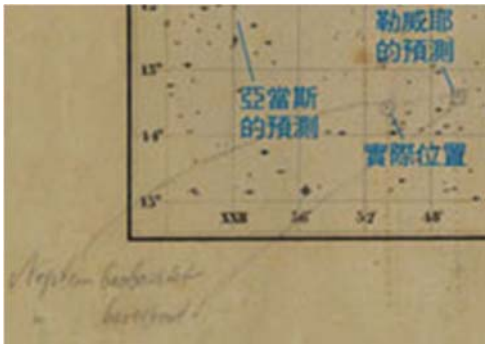
勇敢的挑戰者：

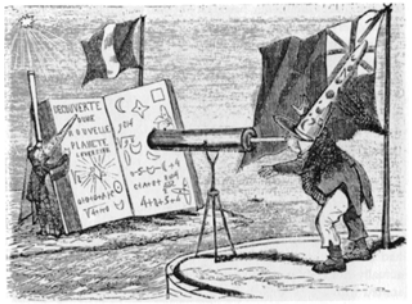
英國人亞當斯　1845年9月　完成計算
　　要求進行的觀測被一再拖延

法國人勒威耶　1846年8月　完成計算
　　1846年9月18日　去信柏林天文台的伽勒
　　1846年9月23日　伽勒收到信
　　當晚即發現預測的新行星



（左起）Adams、Le Verre、Galle





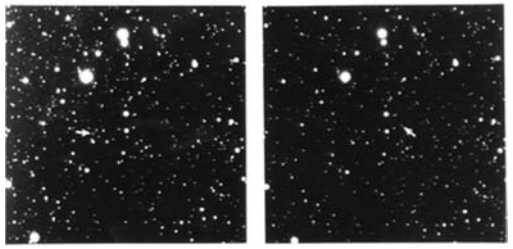
「祝融星」　冥王星的發現

為了解釋水星軌道近日點的進動問題， 1859年勒威耶提出以下解釋：存在一顆與水星大小相仿、距離太陽為水星一半的行星、公轉週期不到20天，名為Vulcan的行星。

「祝融星」從來不曾被觀測到！

P. Lowell 相信海王星之外存在另一顆行星，並專門建立一座天文台；但經多年搜尋人們一直未能發現它的蹤影。

1930年2月，C. W. Tombaugh終於找到它，後命名為冥王星。

1930年1月23日及29日拍攝的同天區照片

日地距離的測定

日地距離的古典測量

直到17世紀中葉，日地平均距離是多少從未精確地測量過。

近代天文學史上第一位正確地測定日地距離的人是卡西尼，方法是：在火星衝日時測得火星視差，再推算出太陽視差。

1716年，哈雷提出利用金星凌日測定太陽視差的方法。
1772年，用此法測得的太陽視差值相當接近現今值。

日地距離的現代測量

1870年代起，人們用婚神星等小行星衝日時測定太陽視差。

1898年發現的愛神星在衝日時與地球很接近，因而在20世紀前半葉被用來測定太陽視差，並得到空前精確的數值。

進入太空時代後則利用雷達測距方法來測定行星視差。

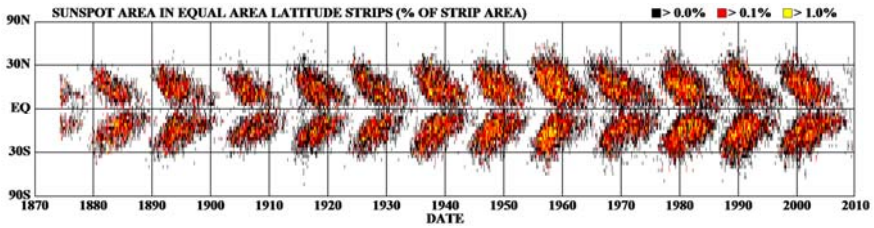
太陽研究的深化

太陽黑子及其變化週期

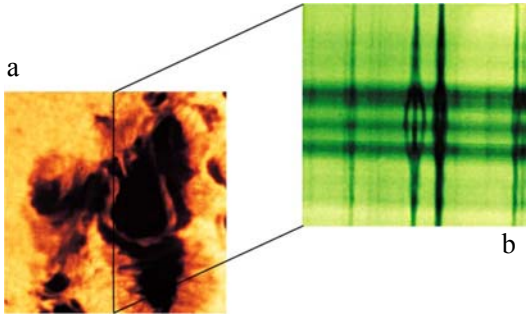
自從1610年伽利略發現太陽黑子後，人們開始對它持續進行研究，但直到18世紀末，關於太陽的知識進展甚少。

德國藥劑師施瓦貝（S. H. Schwabe）從1826年開始每天計數黑子數目，持續43年之久，期間於1843年發現太陽上可見黑子的數目以10或11年的週期系統地變化。

1894年，G. F. W. Spörer發現黑子在日面緯度的分布規律；1914年，英國天文學家蒙德將其表示為「蝴蝶圖」。



1908年，美國著名天文學家海爾（ George Ellery Hale ，1868–1938）發現黑子與磁場有關：



太陽磁場造成的塞曼分裂

（a）穿過黑子的黑線指示分光儀狹縫對準的地方。（b）在所得到的光譜中，正常太陽光譜中間的一條譜線被分裂成三條子線。三條線之間的間距相對應的太陽黑子磁場，比地球磁場大約強5000倍。

太陽各層次的研究

我們直接看到的太陽明亮的原面稱為太陽光球，是太陽大氣的底層，除了黑子之外，19世紀末還發現了米粒組織。

在光球之上的一層太陽大氣稱為色球，19世紀末發現「耀斑」爆發。色球層上的另一重要現象是日珥。

太陽大氣的最外層稱為日冕。1950年發現日冕中存在著一些輻射很弱、亮度比周圍小得多的區域，稱為冕洞。

太陽能源的探討

對太陽能量的來源，從19世紀開始，人們先後提出過化學能、隕星降落、放射性元素衰變、收縮時未能轉化為熱能等假說，然均不足以解釋太陽輻射能的長期問題。直到1937–8年，Weizsäcker和貝特（H. A. Bethe）分別提出氫聚變為氦的熱核反應理論，才基本解決了太陽（包括恆星）的能源問題。

對月球的深入認識

月面性質的瞭解

自伽利略於1609年率先用望遠鏡觀察月面之後，赫維留斯（Johannes Hevelius，1611–1687）等人詳細地描繪月面結構，並為許多月面特徵物命名，其中許多一直沿用至今。

赫維留斯

1837年，J. H. von. Mädler出版《月面學》，書中首次敘明：月球世界是一個無水、無空氣、無生命的處所，這是對月球認識的重要進展。

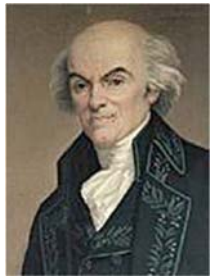
1950年代末，蘇聯和美國相繼對月球進行太空探測。

赫維留斯所繪的月面圖

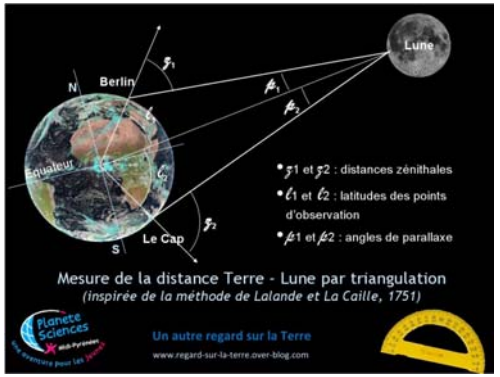
地月距離的測定

對月球距離的測定可以追溯到古希臘天文學家Hipparchus。

首次用三角方法測量地月距離的是法國天文學家拉卡伊（ Nicolas-Louis de Lacaille）及拉朗德（Jérôme Lalande） 。



拉卡伊（上左）、拉朗德及其測地月距離的方法

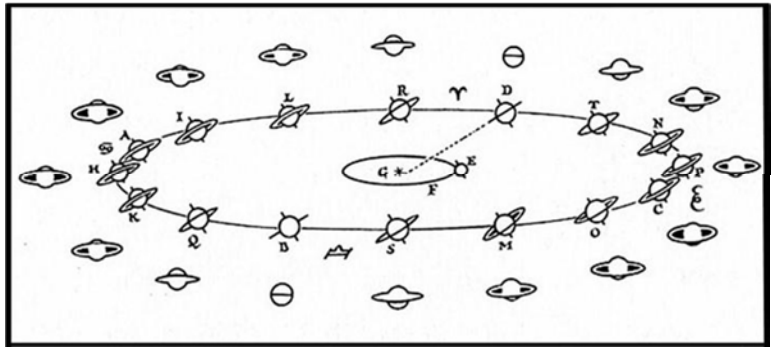


人類進入太空時代後，地月距離的測定有了革命性的進展。

關於行星和衛星的新發現

土星光環的發現

1610年7月，伽利略發現土星兩側有「凸出物」。1656年，惠更斯使用性能好得多的望遠鏡終於看清土星環，並於1659年出版《土星系統》，對土星環外觀變化做出解釋。



惠更斯所繪土星光環的外觀變化

衛星的陸續發現

1610年1月，伽利略發現木星的4顆大衛星。

1655年，惠更斯發現土星的最大衛星「泰坦」（土衛六）。

卡西尼於1671和1672年相繼發現土衛八和土衛五，又於1684年發現土衛三和土衛四。

1787年，赫歇爾發現天衛三和天衛四； 1789年他又發現土衛一和土衛二。

1846年，W. Lassell發現海衛一；1851年他又發現天衛一和天衛二。

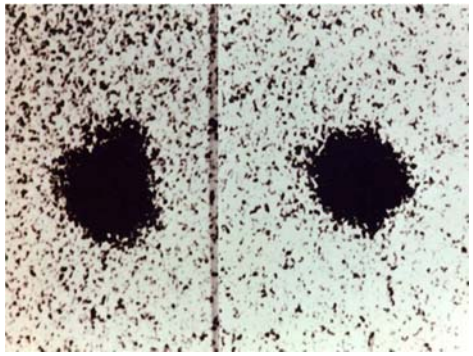
1877年，A. Hall發現火衛一和火衛二。

用目視觀測發現的最後一顆衛星是木衛五，由巴納德（E. E. Barnard）於1892年發現。

1898年，W. H. Pickering首先用照相方法發現土衛九。

進入20世紀，天文學家用照相觀測發現了更多的衛星。至1950年代，已發現的衛星數目分別為：木星12顆、土星9顆、天王星5顆、海王星2顆。在太空時代到來後，探測器飛臨類木行星的上空，衛星的發現更進入了突飛猛進的時期。

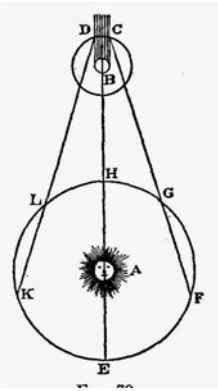
1978年6月，James W. Christy在查看冥王星的照片時發現了冥王星的衛星，它被命名為「卡戎」（Charon，冥衛一）。



對木星的新發現

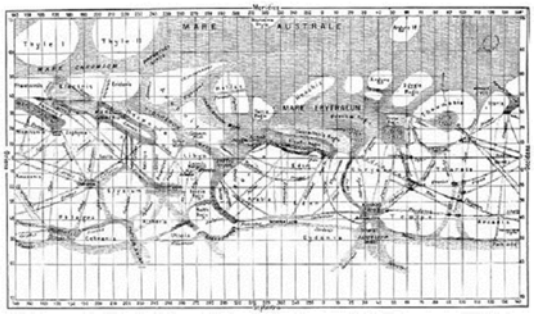
1665年，卡西尼發現木星表面的「大紅斑」，並利用它測定了木星的自轉週期。 卡西尼長期從事木衛被木星掩食的觀測，並於1668年編成第一本木衛星曆表。1672年，勒默爾（Ole Rømer）發現卡西尼的木衛星曆表常與觀測不符；1676年宣布這表明光速是有限的，約為21萬公里/秒。

卡西尼（左）與勒默爾



對火星的各種發現

1887年，火星大衝期間，G. V. Schiaparelli發現火星表面有一些網格狀的線條，他稱之為canali，義大利文水道之意〔英文當作channels〕，但卻很快被誤譯為英文字中的運河(canals)。這一名稱引起了種種有趣的猜測，並引發了探索「火星人」的持久熱潮。



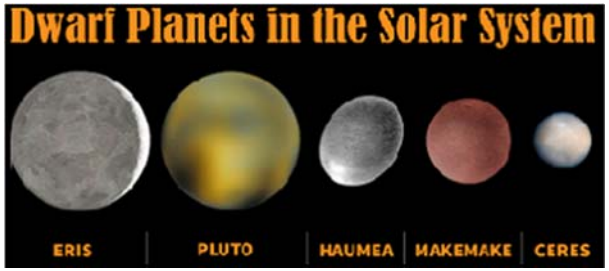
Schiaparelli描畫的火星表面水道圖

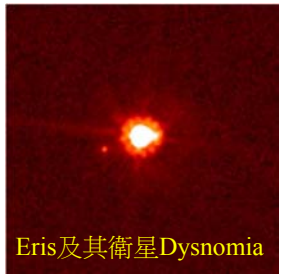
重新認識行星並定義矮行星

自1930年發現冥王星後，人們就推測在冥王星之外可能還存在「第十顆大行星」，但長期未有任何發現。

2003年10月，M. Brown等人發現在冥王星之外的一個天體，暫時名為Xena。Xena的發現對冥王星的行星地位帶來重大挑戰；天文學家面臨著新的局面，即重新認識行星。

2006年8月，天文學家重訂新增矮行星的分類；冥王星降格為矮行星。9月將Xena正式命名Eris，中譯閻神星。





Eris及其衛星Dysnomia

關於彗星和流星的發現

對彗星認識的深化

牛頓終於認清彗星的本質：彗星與行星一樣，是受太陽引力驅動的天體，其扁長軌道延伸至土星軌道之外。

哈雷彗星的如期回歸激發了人們對彗星的極大興趣，不再消極地等待彗星出現，開始主動系統地尋找，從此彗星天文學成為天文學的一個重要分支。

梅西葉（Charles Messier，1730–1817）是系統尋找彗星的第一人，編有《梅西葉星表》。

1818年，J. L. Pons發現一顆彗星，恩克（Johann Franz Encke，1791–1865）發現其週期只有3.5年，並預言它將於1822年回歸；這是按預測回來的第二顆彗星，被稱為恩克彗星。對它的多次觀測導致對彗星的正確解釋：彗星在接近太陽時因物質蒸發而不斷損失質量。

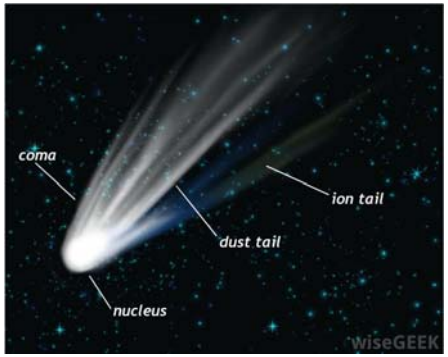
對彗星結構和本質的認識

自19世紀中葉天體分光術誕生以來，天文學家就將它應於於彗星的研究。1864年，G. B. Donati根據彗星光譜指出彗星不僅反射太陽光，且本身也發光。哈金斯（William Huggins，1824–1910）從彗星光譜中發現了碳氫化合物的譜線，從而首次在地球之外發現分子的形跡。

20世紀，說明彗尾內的大氣受太陽光驅動的機制，並促進了彗核組成的現代理論。

1949年，惠普爾提出彗星的「髒雪球理論」。

Fred Lawrence Whipple（1906–2004）

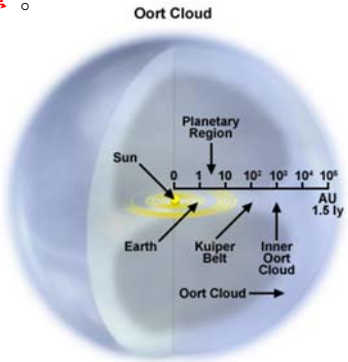


對流星和流星雨的正確認識

歐特雲和柯伊伯帶的發現

1950年，歐特（Jan Hendrik Oort ，1900–1992）經由對長週期彗星的研究，提出包圍整個太陽系的球型區域歐特雲。 1951年，柯伊伯（Gerard Kuiper ，1905–1973）為了解釋海王星軌道的攝動變化，提出海王星軌道外存在一個環型區域，後稱柯伊伯帶。

歐特（左）和柯伊伯



恆星認識的深化

16世紀末，恆星圈的觀念開始被破除。

對恆星在天空運動的認識，直到18世紀早期才得以實現。

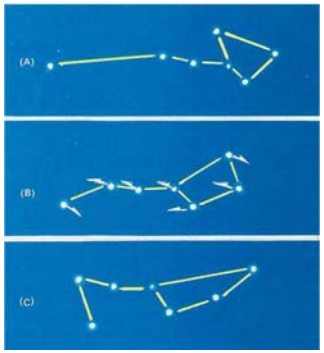
19世紀中葉，由於技術的發展，天體物理學應運而生，人們得以瞭解恆星的物理和化學性質，實現了對恆星認識的突破性進展。

對於恆星運動和視位置變化的認識

恆星自行的發現

1717年，哈雷發現天狼、大角、南河三等星的位置與托勒密時期不同、因而發現了恆星自行。

恆星的自行、距離和視向速度等量是描繪銀河系結構和運動的重要參數。

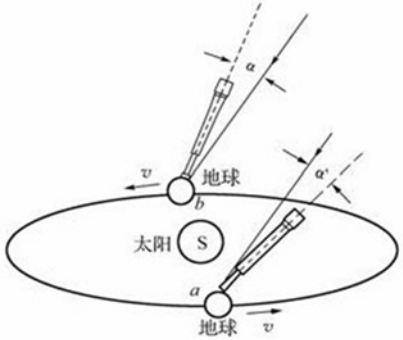


北斗七星在10萬年前後的位置變化

光行差的發現

1725年起，布拉德利（James Bradley，1693–1762）在尋找恆星周年視差的過程中發現一種新現象，至1728年始悟出是光行差現象。光行差明確地證實地球在繞太陽公轉，並可藉之推算出光速為31萬公里/秒。

布拉德利

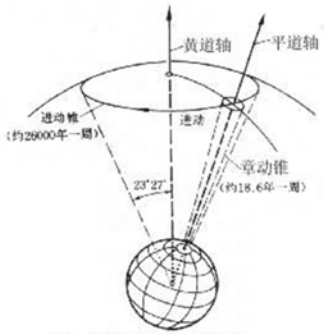


恆星光行差成因圖示說明

章動的發現

1727年，布拉德利又發現他測得的恆星同北天極的角距離，扣除歲差和光行差之後仍有細微的變化。他推測這可能是月球的影響使地球的自轉軸發生了顫動，在進行了20年的觀測後，布拉德利於1747年底宣布此一發現，並將該運動稱為地軸章動。

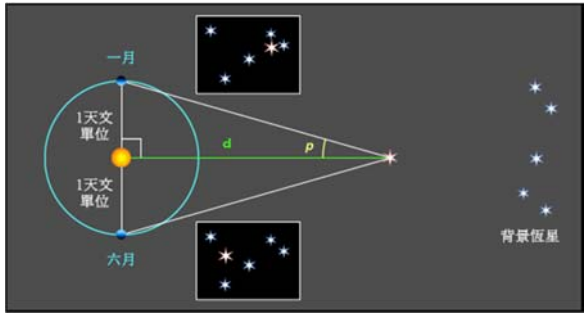
歲差引起的北天極的移動



地球自轉軸的章動

恆星視差的發現

經長期的失敗後，1830年代末，人們終於成功測出恆星周年視差。首先取得突破的是貝塞爾，他於1838年12月宣布測得天鵝座61星的視差為0.31″（今值0.294″）。1839年，T. Henderson宣布測得南門三的視差； 1840年， F. G. W. Struve宣布測得織女星的視差。



歲差引起的北天極的移動

F. W. Bessel
（ 1784–1846 ）

從人類認識宇宙的歷史來認識恆星視差測定的意義，它攻克了反對哥白尼日心說的最後一個堡壘。

恆星視差的測定開啟了精密天體測量的時代。這種基於三角學測量原理的天體視差是唯一一種天體距離直接測定的方法。恆星視差的測定是認識整個宇宙大小和結構的必要的基礎性工作。

恆星自轉的研究

1877年，W. de W. Abney首先提出：一些恆星的光譜中，譜線很寬，可能是由自轉引起的。

1909年，Frank Schlesinger首次確定地發現了恆星自轉的證據。十多年後，人們研究了由譜線的型態確定自轉的方法。

恆星位置測量的精確化

目視觀測星表的進展

例：John Flamsteed的《英國天文志》

照相測量星表問世

第一本照相測量星表《好望角照相巡天星表》

恆星本質的認識

對恆星本質的真正瞭解只有在天體物理學誕生以後才得以實現。藉由對恆星光譜的分析，可獲得關於其物理性質、化學成分和某些運動學方面的觀測資料。但我們接收到的恆星光線只來自於恆星表面的光球層。

1920年代，愛丁頓（Arthur Stanley Eddington，1882–1944）建立了恆星內部結構理論，並於1924年提出恆星的質光關係式。

愛丁頓（上）和康德

恆星的能源，在太陽能源問題解決的同時，也就迎刃而解了。

對恆星形成的探索，最早可以上溯至18世紀中葉康德和90年代拉普拉斯先後獨立地提出的太陽起源的星雲假說。到了20世紀，一方面在理論上有重要進展，如發現了赫羅圖；另一方面在觀測上更有重大突破，如在1940年代發現了金牛T型星和HH天體。射電天文學和太空天文學的崛起，許多重大發現接踵而至，如探測到分子雲裏的毫米波輻射和紅外輻射，發現了中子星和恆星級黑洞等。一系列觀測事實支撐起理論的大廈，人們終於構築了恆星起源和演化的完整理論。

雙星的發現和觀測

目視雙星的發現和研究

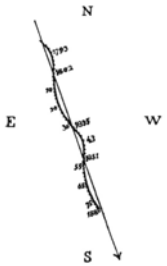
從17世紀中葉到18世紀，人們發現：一些恆星，裸眼看上去是單星，在望遠鏡裏看到的卻是雙星。1650年最先發現開陽有這一特性，此後續有發現。雙星一向被人當成空間同方向的兩顆星，因透視作用，偶然落在我們的同一條視線上。但到了18世紀中葉，人們注意到所發現的雙星的數目與恆星在透視上偶然接近而成為雙星的機率相比過分大了，因此有許多雙星一定是兩顆在一起有物理聯繫的恆星。雙星的開創性工作應屬於赫歇爾。1804年他確認大多數雙星不是表面上的「光學雙星」，而是真正的「物理雙星」。此一發現稟明牛頓的萬有引力定律在離地球遙遠的恆星系裏有同樣適用，這是天文學的一大進展。赫歇爾之子John繼續父親關於雙星的工作。

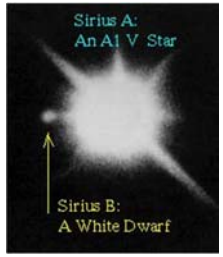
其他類型雙星的發現和研究

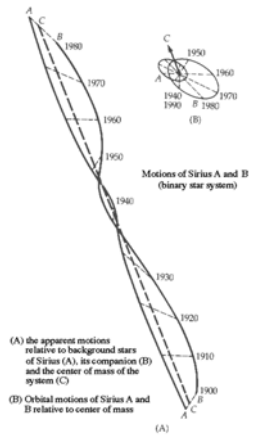
1782年，古德里克提出英仙座β的光度變化是由雙星中兩顆子星互相掩食造成的，這是第一顆被發現的食雙星。

1887–9年，皮克林發現第一顆分光雙星大熊座 ζ_A。

1834年，貝塞爾發現天狼星的自行不是直線，而是波浪型的曲線；1840年，他發現南河三亦存在此現象。1844年，他提出天狼星和南河三都各有一顆很暗的伴星。1862年，A. G. Clark發現了天狼伴星。







變星的發現和觀測

變星的目視觀測

著名的變星英仙座β（大陵五）在希臘神話中被稱為Medusa，阿拉伯人稱之為Algol，意為「魔星」。

第一顆被天文學家發現的變星是鯨魚座o（芻蒿增二），由 F. Fabricius 於1596年發現；經60餘年觀測確定其亮度變化有大約11個月的週期。

1782年，古德里克（John Goodricke，1764–1786）用目視方法測定了「魔星」的光變週期為2天20小時49分。1785年和1786年，他又發現了另兩顆著名的變星仙王座δ（造父一）和天琴座β（漸臺二）。他的這些工作開創了變星的光譜測量。

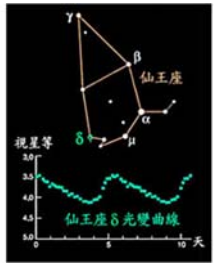
古德里克

變星的照相和光電測量

各種類型變星的發現和研究

脈動變星是變星中為數最多的一類，其中最著名的的一種是造父變星。1914年，沙普利（Harlow Shapley，1885–1972）指出：造父變星光變的原因是由於它的徑向脈動。1918–9年，愛丁頓建立了造父變星的脈動理論，並導出造父變星的週光關係。

沙普利



造父變星構造及其週光關係

新星或超新星是原來肉眼不可見的星體，突然爆發，光度陡然增強而變得十分明亮的恆星。中國在甲骨文上就有「新大星」的記錄，在後來歷代的典籍中常有客星的記載，客星就是我們現在所說的新星或超新星。在西方，第一顆被認證並記錄的[超]新星是第谷於1572年11月發現的第谷超新星。

除新星或超新星外，20世紀上半葉還發現了其他類型的變星，如：耀星、金牛T型星、磁變星。

直到19世紀中葉，儘管人們對恆星世界的認識不斷擴大和深入，但還侷限於其位置和運動的描述；然隨著望遠鏡的應用和測量精度的提高，實現了恆星自行和視差的測量，人們在這一範疇的認識已經有了質的飛越，這為恆星天文學的創立和發展，以及對銀河系的結構和運動的瞭解開闢了道路。至於對恆星物理性質的瞭解，則有待天體物理學的誕生。

銀河系概念的確立和發展

銀河系概念的提出

「恆星天」觀念的破滅

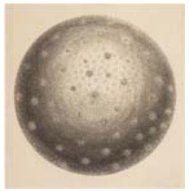
第一位以科學態度探索銀河本質的科學家是伽利略。

1576年，迪吉斯突破了哥白尼的認識，他認為：恆星並不固定在環繞太陽的球層上，而是分散在越來越大的距離中。布魯諾進一步提出：宇宙無限，太陽不是宇宙中心，而只是一顆普通恆星。

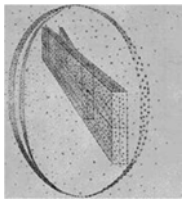
惠更斯進一步闡明布魯諾的觀點，即天空的恆星都是宇宙裏的太陽。根據它們之間光度的比較，惠更斯估計天狼星與地球的距離是日地距離的27000倍（僅為實際值的1/20）。後來，哈雷發現恆星自行，布拉德利發現光行差；這些發現都以觀測事實動搖了認為恆星是固定在「恆星天」上的光點的傳統觀念，支持了恆星是遙遠的太陽的見解。

恆星世界結構的推測

1720年代起，一些學者提出：我們所看到的恆星，連同銀河裏的無數恆星，共同構成了一個龐大的恆星系統；宇宙中有無數多個這種龐大的天體系統。



1720–1730年代，E. Swedenborg最早推測：恆星都是銀河的成員，它們集合在一起，構成一個動力學上完整的體系，這種體系在宇宙中並非唯一。



1734年，英國哲學家賴特（Thomas Wright，1711–1786）探討了恆星在宇宙中的分布，後於1750年首次提出銀河系的概念。

賴特及其銀河系模型

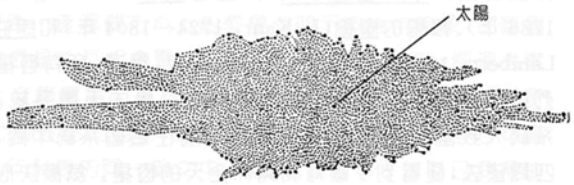
1755年，康德發表《自然通史和天體論》（中譯通作《宇宙發展史概論》），本書主要內容是提出了太陽系起源的星雲學說。當時人們已經在望遠鏡裡看到許多星雲，而且有許多呈現橢圓狀的輪廓，康德因而推測這些星系（銀河系）應是盤狀物終於得到了關於銀河系的第一個基本正確的模型。

以上種種關於銀河系的天才預見，儘管有的在相當程度上符合於實際情況，畢竟停留在推測階段。首次經由觀測證實銀河系實際存在的天文學家是赫歇爾家族。

John Herschel

銀河系概念的初步確立

赫歇爾利用「恆星計數法」，先後進行了1083次觀測，一共數了683個取樣天區中的11萬8千顆恆星。認真分析觀測資料後，於1785年獲得了一幅扁而平、輪廓參差、太陽居中的銀河系結構圖。

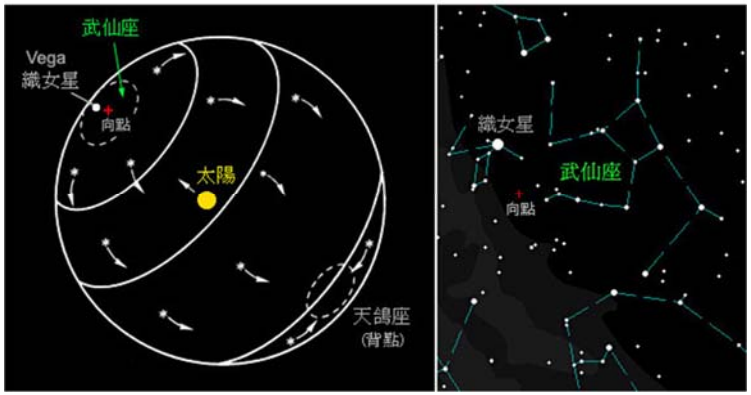


赫歇爾的銀河系模型

赫歇爾用實際觀測證實了先賢關於銀河系的推測；從此人們的視野從太陽系擴展到遠為廣闊的銀河系，有了一個飛躍的發展。赫歇爾的開創性工作使銀河系概念初步確立。

太陽本動的發現和確立

1783年，赫歇爾發現太陽正朝著武仙座方向運動，此一運動稱為太陽的本動。



如果說哥白尼推翻了地球是靜止的論斷，證明地球和別的行星一樣運動，那麼赫歇爾也破除了太陽固定的說法，證明太陽與別的恆星一樣在空間移行。

星雲的觀測

阿拉伯人首次紀載了仙女座大星雲

1519年，「發現」大、小麥哲倫[星]雲。

謎樣的星雲　《梅西葉星表》

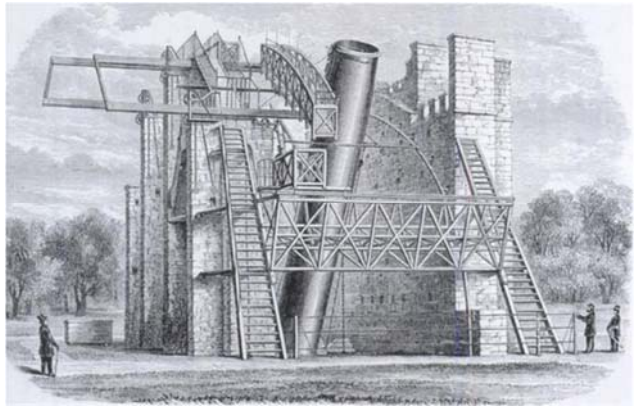
赫歇爾親手製作了當時最大的望遠鏡，對星雲的研究取得新的進展。

梅西葉

大（左）、小麥哲倫雲

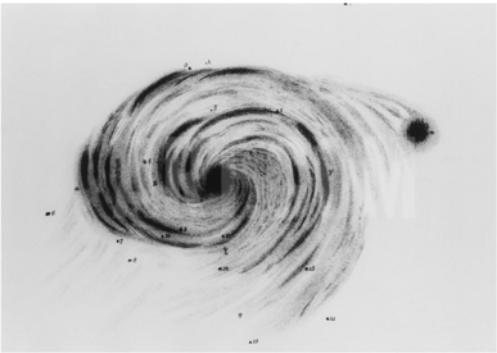
19世紀中葉，愛爾蘭天文愛好者羅斯伯爵三世（ 3rd Earl of Rosse ，本名William Parsons ，1800–1867）製造了當時世界上最大的望遠鏡，口徑達1.8米，從1845年稱雄至1917年。

羅斯伯爵及其大望遠鏡

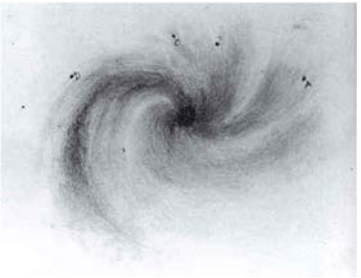


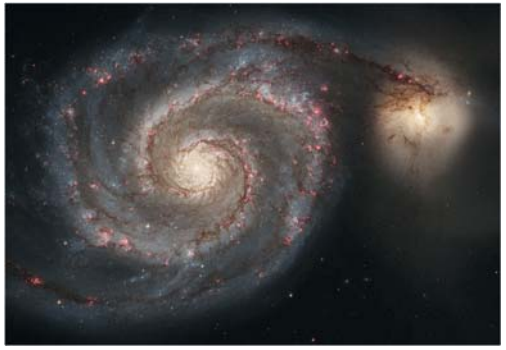
1845年，羅斯伯爵發現雲霧狀天體 M51有旋渦結構，1848年他又辨認出 M99 的旋渦結構。

旋渦星雲的本質？



（右上）羅斯繪製的M51
（右下）現代拍攝的M51
（下）羅斯繪製的M99

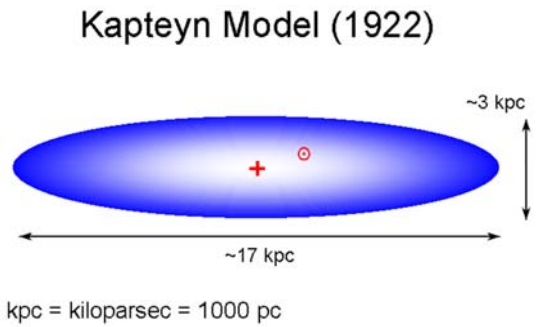




銀河系的近代研究

卡普坦宇宙

1922年，卡普坦（Jacobus Cornelius Kapteyn，1851–1922）提出一個銀河系模型：銀河系是一個直徑4萬光年的扁扁平系統，太陽位於中心附近，距太陽越遠，恆星數目越少。後來被稱為「卡普坦宇宙」。



太陽在銀河系中的位置

1916–1917年，沙普利發現球狀星團相對於太陽的不對稱分布現象，合理的解釋是太陽並非位於銀河系中心。1917年，他提出了一個直徑30萬光年、厚3萬光年，銀心位於人馬座方向距太陽5萬光年處的銀河系模型。

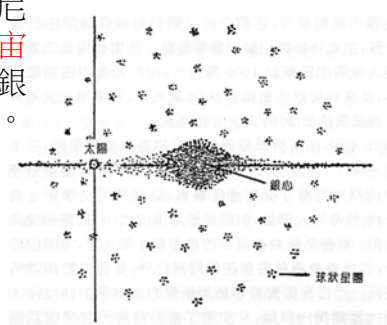
沙普利把太陽移離銀心，是繼哥白尼之後人類第二次破除了自己處於宇宙中某種中心地位的觀念，且為建立銀河系的真實圖像開闢了正確的途徑。

銀河系自轉的研究

銀河系旋臂的研究

星際消光和星際物質的研究

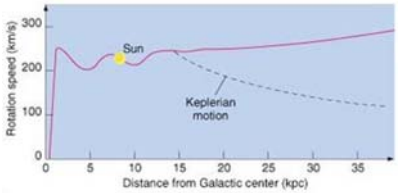
星族和星協的發現



球狀星團相對於太陽的不對稱分布現象

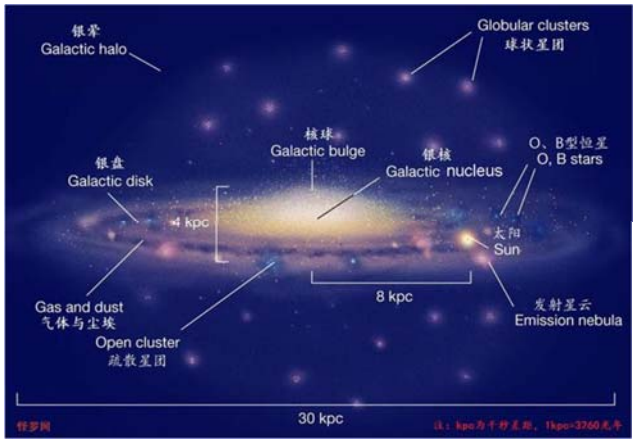
銀河系的現代研究

銀河系自轉曲線的測定與銀河系的質量



銀河系自轉曲線

銀河系中央的探測



銀暈包含大量暗物質

銀核中央有約400萬太陽質量的超大質量黑洞

天體物理學的誕生和早期發展

1825年，法國著名的哲學家孔德寫道：「恆星的化學組成是人類永遠也不可能知道的。」然而，人類對未知世界的洞察能力是人類自己都無法想像的。就在孔德的斷言之後還不到半個世紀，在物理光學基礎之上新興的天體物理學，就能夠告訴我們恆星的化學組成以及更多的東西。

天體物理學（astrophysics，天文物理學）的產生依賴於如下三種光學方法的使用：分光術（spectroscopy）、測光術（photometry，光度學）和照相術（photography）。

在天體物理學誕生過程中，天體分光術起了最重要的作用；但分光術若只依靠人眼作輻射接收器，那麼它的效果將大打折扣，只有分光術與照相術「結親」後，前者才更有力地推動天體物理學的發展。此外，測光術與照相術的「結親」也推動了天體物理學的誕生和發展。

天體照相術

照相術的誕生

1839年8月19日，法國政府公開達蓋爾照相法（Daguerreotype，也稱銀板照相法）。

1840年，約翰・赫歇爾提出定影法。

1840年代初，W. H. F. Talbot發明玻璃底片，並以它出版了世界上第一本用照片做插圖的書。

1851年，發明珂珞酊濕片。

1871年，發明明膠乾板，經改進後，到1880年，其靈敏度已遠超珂珞酊濕片。起初，明膠乾板的乳膠只對藍、紫等光敏感，對紅光幾乎沒有反應，1873年，在其中加入有機染料使對橙、紅光也敏感，在拍攝天體光譜時特別有用。至此，改進底片的一些關鍵步驟都已完成了。

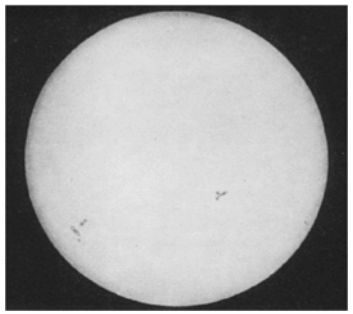
達蓋爾及其照相機

拍攝天體

第一張天文照片(?)

達蓋爾照相術一問世，John Draper就在1840年用小折射望遠鏡經20分鐘曝光，拍得了一張輪廓大體可以分辨的月球照片，這是世界上第一張天文照片。

1845年，Fizeau和Foucalt合作，拍攝了黑子清晰可見的太陽白光照片。



珂珞酊濕片法問世後，1860年，W. de La Rue拍攝到了清晰的日珥照片。

明膠乾片問世後，隨感光靈敏度迅速提高，在天文照相中的應用越來越廣泛。1882年拍得彗星照片，1888年拍得仙女座大星雲的照片。

與天體分光術、天體測光術「結親」

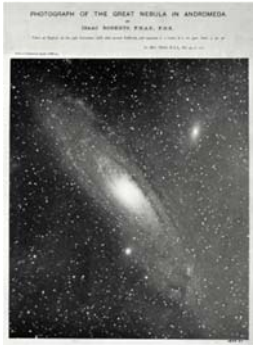
照相底片與人眼相比有四大優點：

客觀性　避免人眼的錯覺和幻覺

累積性　可長時曝光

文獻性

高效性



Isaac Roberts拍攝的仙女大星雲照片

由於照相底片與人眼相比有以上優點，天體分光術問世後，只有在最初若干年中，人們才利用人眼配合分光鏡觀測天體的光譜，後來很快改用稜鏡照相機或有縫射譜儀拍攝天體的光譜，這就是照相術與天體分光術「結親」；類似地，天體測光術問世後，人們也只有在最初若干年中用人眼配合目視光度計測量天體的目視星等，後來很快改用照相測光方法測量天體的照相星等，這就是照相術和天體測光術「結親」。

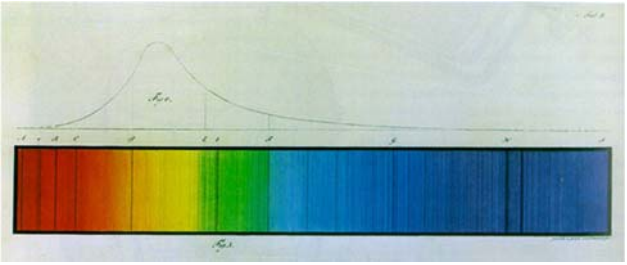
天體分光術

光譜分析術問世

1666年　牛頓做色散實驗

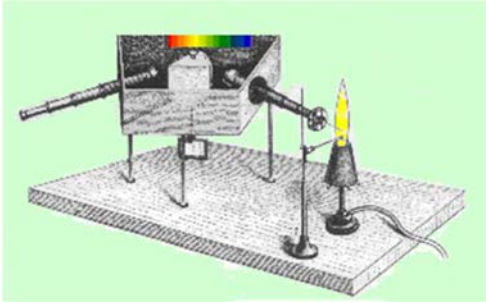
1802年　W. H. Wollaston在稜鏡之前加一個狹縫觀測太陽，發現太陽光的連續光譜中還有若干條暗線。

1814年　夫琅和費（Josef von Graunhofer，1787–1826 ）發現太陽光譜中的夫琅和費線



夫琅和費和他得到的太陽光譜

1859年，德國物理學家基爾霍夫（Gustav Robert Kirchhoff，1824–1887）與同事化學家本生（Robert Wilhelm Bunsen，1811–1899）合作研究火焰光譜，開創了光譜分析術。



基爾霍夫 的分光儀

基爾霍夫 (左) 與本生

基爾霍夫定律

光譜分析法問世後，基爾霍夫又揭開了太陽光譜中的夫琅和費線之謎。他在1859年提出兩條定律：第一，每一種元素都有自己的特徵光譜；第二，在一定條件下，每一種元素可以吸收他原先能夠發射的譜線。於是，藉由太陽光譜就可以確定太陽中有哪些地球上常見的元素。推而廣之，用分光（將單一的光線用稜鏡或光柵展開成光譜）的方法也可以發現恆星上有哪些化學元素。

氦元素的發現

1868年8月18日　日全食

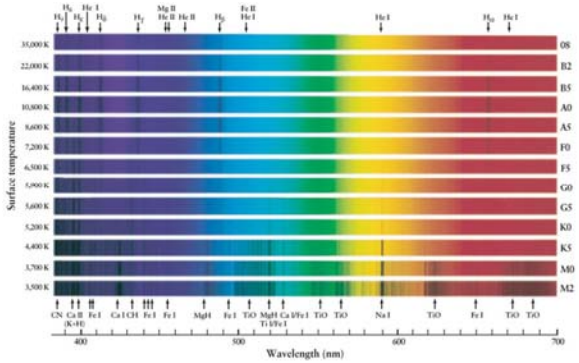
法國科學院鑄造的金質紀念章，其中一面是Janssen（左）和Lockyer的頭像，另一面是駕著馬車的太陽神阿波羅，上面圍繞半圈文字的含意是「1868年8月18日太陽突出物分析」。

恆星光譜分類

塞奇（Angelo Secchi，塞基）按照其光譜特徵，將恆星分成四類：白色星、黃色星、橙色和紅色星、暗紅色星。他相信，這四類恆星在表面溫度方面是不同的。之後哈佛天文台對恆星光譜分類進行了大量研究，其中以坎農（A. J. Cannon，1863–1941）的工作最出色。

坎農

她將前人早期建立的光譜分類法改造為劃分O、B、A、F、G、K、M、R、N、S等類型的分類法，稱為「哈佛分類法」，在天文學上廣泛使用。

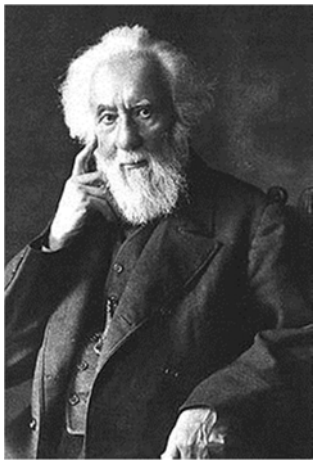


恆星譜線特徵的研究

研究恆星特徵譜線的開創者是英國天文學家哈金斯（William Huggins，1824–1910）。1863年，他發現在許多亮星裏有屬於鈉、鐵、鈣、鎂、鉍等元素的譜線，表明遙遠的恆星的化學組成並非與地球完全不同。1868年，他首次測出天狼星的視向速度。

對天體視向速度的研究導致了分光雙星的發現。

利用譜線的特徵型態的可求得恆星的磁場和自轉速律等物理性質。



哈金斯

天體測光術

目視測光

天體測光術專門觀測星星有多亮。古希臘人Hipparchus（喜帕恰斯、依巴谷）將肉眼可見的恆星分為六個星等。

經過近二千年的停滯，目視測光才由古德里克重新啟動。科學的恆星目視測光工作是從19世紀中葉才開始的。

1857年，英國天文學家波格森（Norman Robert Pogson，1829–1891）建立了光度星等的關係式。他指出，一等星的平均亮度等於六等星的平均亮度的一百倍，因此每個星等差之間的光度比率等於100的開5次方即2.512。

照相測光

光電測光

反射望遠鏡的變革與發展

19世紀中葉反射望遠鏡的革命

玻璃鍍銀技術　真空鍍鋁技術

20世紀前期反射望遠鏡的大型化

海爾的「三級跳」

折反射望遠鏡的誕生

綜上所述可以得知，正是由於照相術、分光術、測光術的問世和發展，以及光學望遠鏡的巨大進展，才導致19世紀中葉天體物理學的誕生，以及19世紀晚期至20世紀前期天體物理學的大發展。探測手段的不斷更新和天文學不斷發展之間的緊密聯繫，不僅在19世紀中葉至20世紀前期可以看到，而且在此後也同樣明顯存在。

河外星系的認證和研究

古代天文學家著重研究的是宇宙的結構，隨著天文學的發展進入近代，特別是在天體力學和天體物理學產生之後，天文學研究的重點向各種天體的運動和性狀轉移。

自賴特之後，星系的觀念得以確立，為現代對宇宙的認識，開闢了道路。在認證銀河系的基礎上，進一步發現並認證河外星系，便成為正確認識宇宙的重要一步。

1850年，洪堡首次提出「宇宙島」觀念，把散佈在宇宙各處的恆星系統比喻為茫茫大海中星羅棋布的島嶼。

在現代的宇宙學研究中，星系被看成宇宙的「分子」。

Alexander von Humboldt

河外星系的認識

確定河外星系的準則

星雲的本質　球狀星團　氣體雲　旋渦星雲是宇宙島嗎？

從19世紀中葉直至20世紀20年代，肯定和否定宇宙島兩種對立的觀點一直爭論不休！

人們認識到要最終確定旋渦星雲是否位於銀河系之外的準則是：(1)確定銀河系的大小和星雲的距離；(2)計算星雲的線度大小，判斷其尺度是否與星系相當；(3)以分辨率更大的望遠鏡分辨星雲裡的單顆恆星。

在1920年代之前，人們還沒有找到一種有效的方法去測定河外（旋渦）星雲的距離。當時，以三角視差法[測定天體距離唯一的直接方法]測定較近恆星的距離，方法已相當成熟而有效；但當恆星距離較遠、例如達到300光年時，測量誤差便與距離本身相當。　需要其他測距方法

造父變星測距法的發現和最初應用

1912年，李薇特（Henrietta Swan Leavitt，1868–1921）公布，小麥倫哲雲內25顆造父變星遵循如下規律：恆星越亮，亮度變化的週期越長。倘若所有的造父變星都遵從同樣的週光關係，那麼只要測出任何一顆造父變星的距離，就可以由光變週期同視星等的關係推導出真正的週光關係；這稱為確定造父變星週光關係的零點。

1915年，沙普利利用11顆造父變星的自行和視向速度資料，以間接的方法求出了它們的距離，進而定出了造父變星週光關係的零點。

造父變星有量天尺的美譽

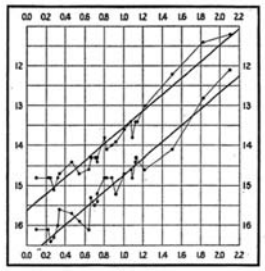


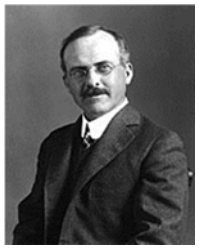
Fig. 2.

Figure from (Leavitt 1912)

造父變星測距法產生後，沙普利首先運用它來測定分布於銀河系內的球狀星團的距離。經由對測量結果的分析，他確定了太陽位於遠離銀心的地方，並提出銀河系的直徑為30萬光年，銀心位於人馬座方向距太陽5萬光年；因而銀河系是一個碩大無朋、無所不包的天體系統。他的觀點與當時一些學者信奉的「宇宙島」看法相悖。

1920年4月，由海爾發起召開了「宇宙的尺度」辯論會，由沙普利和柯蒂斯（Heber Doust Curtis，1872–1942）[他認為銀河系直徑僅4萬光年，且太陽居中心]代表正反兩方，論題是銀河系的大小、結構和旋渦星雲的本質。

由於當時觀測條件的侷限，這場辯論雖然激烈，最後並沒有得到肯定的結論。但不久之後，這個難題終於被哈伯解決。

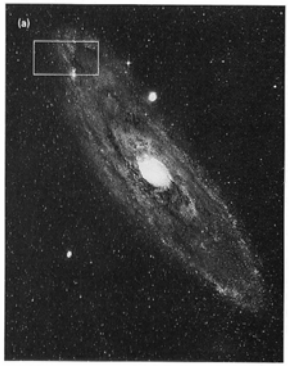


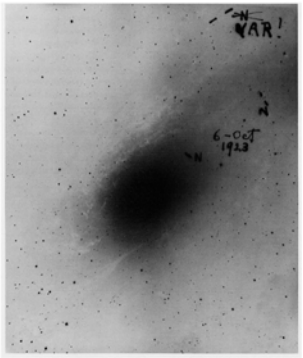
柯蒂斯

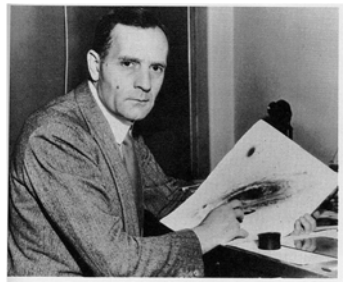
哈伯的歷史性貢獻

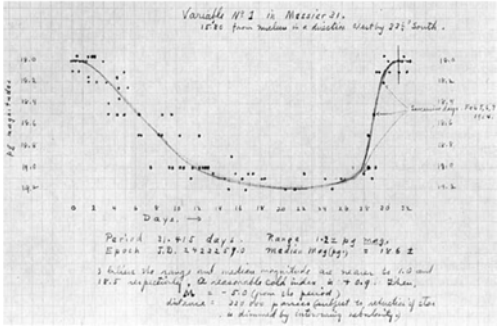
河外星系的認證

1923–1924年，哈伯（Edwin Hubble, 1889-1953；大陸用「哈勃」）用當時最大的 Hooker 望遠鏡將旋渦星雲M31和M33的外圍區域分解為單個恆星，並找到了造父變星。









哈伯的造父變星光變曲線

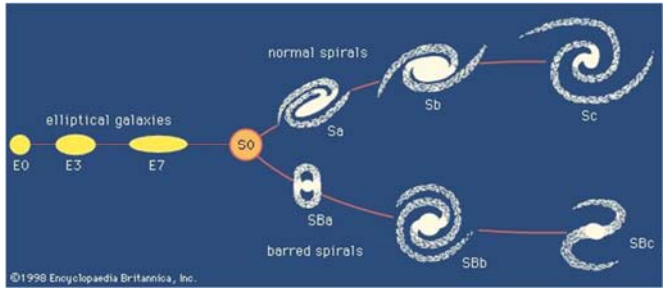
哈伯利用沙普利確定的週光關係訂出了這兩個星雲的距離均遠達90萬光年，因而必位於銀河系之外。

1925年元旦，哈伯的這項工作由他人代表在一場天文學學術會議上宣布，與會者都認為關於宇宙島的爭辯已告終結，河外星系的存在已確鑿無疑。從此，人類的視野開始超出銀河系，進入星系世界，從而為此前不久由愛因斯坦開創的現代宇宙學的研究奠定了堅實的基礎。

星系的哈伯分類法

哈伯在前述工作後，隨即又投身於對河外星系的研究。

1926年，哈伯提出河外星系按型態可分為三類：旋渦星系、橢圓星系、不規則星系。此分類法從20世紀20年代至50年代，又經他本人和其他天文學家的修改和補充進一部細化。哈伯創立的這種分類方法成為星系分類的經典方法，稱為**星系的哈伯分類法**，一直沿用至今。



哈伯星系分類音叉圖

哈伯定律的發現

哈伯在河外星系研究中的另一項重要貢獻是發現哈伯定律

1914年，V. M. Slipher 測出15個旋渦星雲的視向速度之後，發現其中竟有13個的光譜線都存在紅移，表示它們都在遠離太陽系而去！1929年，哈伯根據他人和自己的測量，分析了24個星系的視向速度與距離的資料，發現河外星系的距離越大，其視向速度就越大，且這些視向速度值絕大部分都為正。

哈伯常數問題

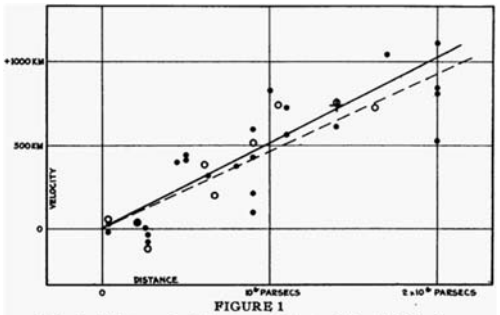


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

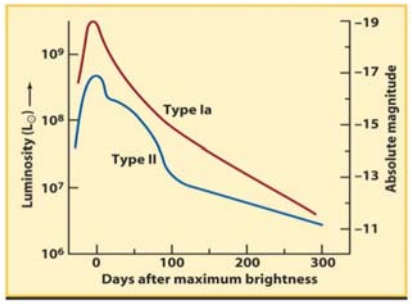
哈伯所得星系視向速度與距離的關係

河外星系研究的重大發現

超新星的認證

巴德（Walter Baade，1893-1960）是繼哈伯以後在河外星系的觀測和研究上作出重大貢獻的天文學家。

1937 年，巴德和茲威基（Fritz Zwicky，1898-1974）發現超新星有兩型：Ⅰ型超新星和Ⅱ型超新星。



超新星的光變曲線

巴德（上）和茲威基

發現兩個星族

1944年，巴德提出存在兩類星族的概念，它們有不同的分布和演化史：一類是年輕恆星，主要分布在星系的旋臂中，稱為星族Ⅰ恆星；另一類是年老恆星，分布在星系的中央區和星系暈的球狀星團中，稱為星族Ⅱ恆星。

河外星系距離的校正

1948年，Palomar 天文台的 200 吋望遠鏡啟用，巴德利用它對 M31 進行詳盡研究。基於所得資料，1952年，巴德提出存在兩類不同的造父變星，它們具有不同的週光關係。人們先前將兩類不同的造父變星混淆，因而測得的天體距離存在錯誤。因此河外星系距離的標尺需要修正：凡是過去以造父變星週光關係為基礎推算得出的距離一律應該加倍。因而解決了此前存在的一些重大問題。

太陽系起源和恆星的形成與演化

太陽系的起源

笛卡兒的渦旋說

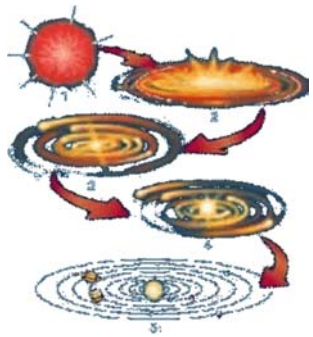
牛頓提出「上帝的第一次推動」

康德和拉普拉斯的星雲說

在康德之後，拉普拉斯在1796年出版《宇宙體系論》，提出了一個太陽系起源的星雲說。

太陽系起源的災變說

太陽系起源的新星雲說



拉普拉斯星雲說示意圖

赫羅圖的建立

揭開恆星演化之謎是20世紀天文學乃至整個自然科學中最偉大的成就之一，赫羅圖則為研究恆星演化奠定了基礎。

莫里的恆星光譜分類

赫茨普龍的研究工作

1911年，赫茨普龍（Ejnar Hertzsprung，1873-1967）刊布昴星團與畢星團的色指數－視星等圖。

羅素的研究工作

與赫茨普龍幾乎同時，羅素（Henry Norris Russell，1877-1957）也在研究恆星的光譜型和光度之間的關係。

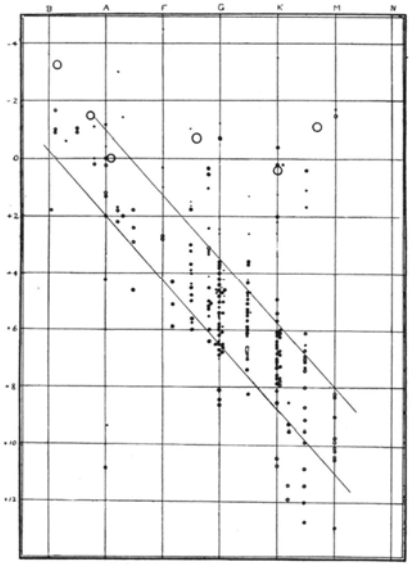
羅素（下）和赫茨普龍

1913年12月，羅素在學術會議上介紹了自己的成果，並於1914年發表文章。

這類光譜－光度圖起初稱為羅素圖，後來發現赫茨普龍在羅素之前做過類似工作，於是1933年以後便稱為赫茨普龍－羅素圖，簡稱赫羅圖。

探討恆星演化的初次嘗試

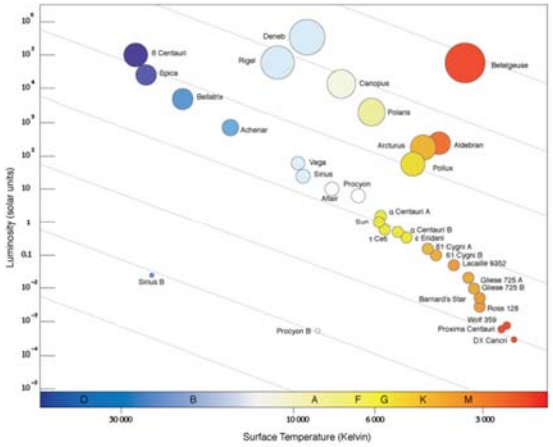
羅素在發表他的第一幅光譜－光度圖後，提出一種恆星演化圖像，他建立在Helmholtz的太陽能源說基礎上，因而是不可能成功的。



羅素在1914年發表的光譜－光度圖

恆星能源和赫羅圖的發展

羅素提出的第一個恆星演化理論雖然失敗了，但卻為以後的成功起了重要作用。隨著恆星能源為題破解，此後應用赫羅圖研究恆星演化的確取得了極大的成功。



一幅現代版的赫羅圖

恆星的形成與演化

形成恆星的星雲

金斯不穩定性

原恆星在赫羅圖上的演化

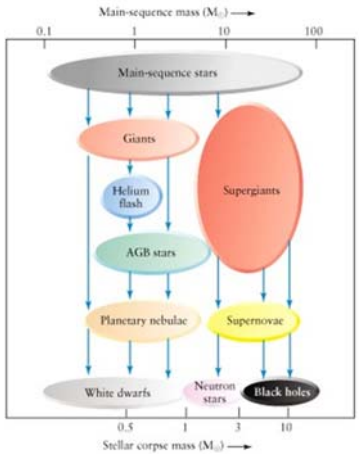
恆星由星雲產生的觀測證據

恆星離開主星序後的演化

[紅]巨星　[紅]超巨星

行星狀星雲　白矮星

超新星爆發　中子星　黑洞



相對論與現代宇宙學

相對論的創立

廣義相對論的天文學驗證

引力波理論與引力波天文學

引力波理論的確立及其驗證　脈衝雙星

引力波的直接探測和引力波天文學

LIGO

時空拖曳效應及其探測

現代宇宙學的誕生與演進

傳統宇宙觀念的演變和危機

奧伯斯佯謬

愛因斯坦靜態宇宙模型

弗里德曼和勒梅特宇宙模型

太初原子

穩恆態和準穩恆態宇宙模型

弗里德曼

（左起）Gold、 Bondi和Hoyle

勒梅特

大霹靂宇宙學

伽莫夫（George Gamow）

宇宙微波背景輻射

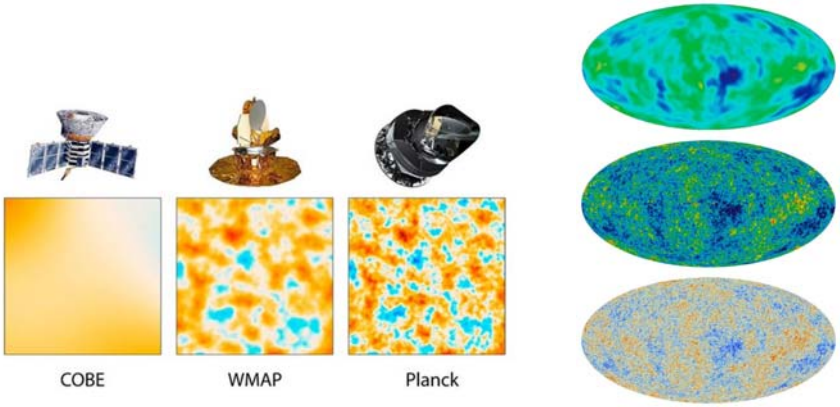
R. W. 威爾森（左）和彭齊亞斯

伽莫夫

關於宇宙學的新發現

宇宙微波背景輻射的黑體形式及各向異性

2006年諾貝爾物理獎



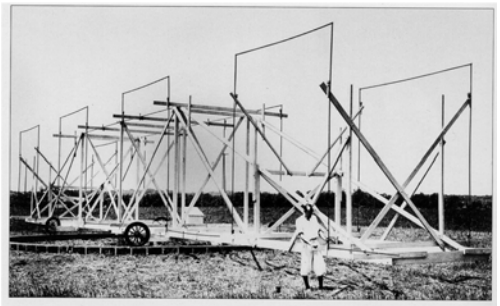
三代探測器所測得的宇宙微波背景輻射比較

射電天文學的誕生和發展

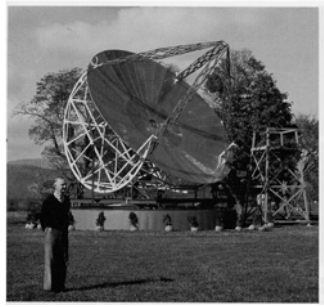
射電天文學的誕生

射電天文學（radio astronomy）接收並研究天體和宇宙物質發射的無線電波，這種無線電波在天文學上又稱射電波。

射電天文學的誕生得益於無線電技術的發展。



Jansky 的旋轉天線



Reber 的射電望遠鏡

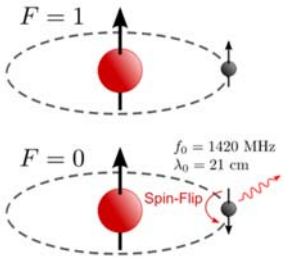
射電天文學的初期發展

太陽射電的發現

21厘米射電譜線的預言和探測

射電技術的進展

大型射電望遠鏡的創建



1960年代的四大天文發現

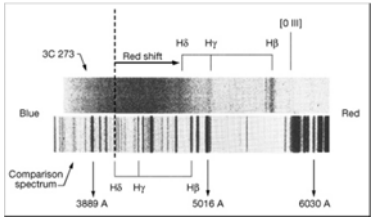
類星體的發現和認證

quasar

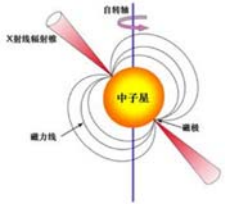
微波背景輻射的發現

射電脈衝星的發現

pulsar　中子星



3C273的光譜



星際有機分子的發現

蟹狀星雲
天關客星

射電天文學的新進展

大型射電望遠鏡

甚長基線干涉測量術

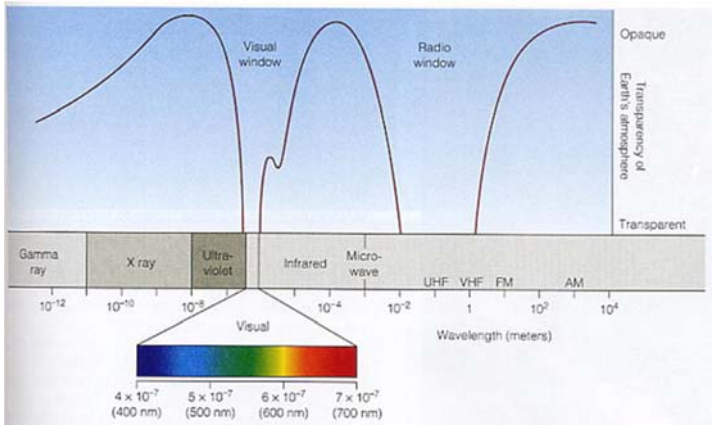
孔徑合成射電望遠鏡

毫米波和次毫米波射電天文學

太空天文學的誕生和發展

太空探測技術的早期發展

電磁波譜與大氣窗口



大氣窗口(atmospheric windows)

火箭理論和技術的發展

von Braun V-2

人類進入太空時代

Korolev Sputnik Gagarin

地球空間環境的探測

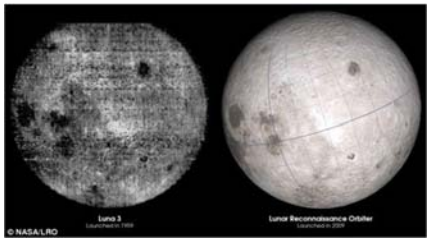
對月球的探測

月球的早期探測

首批載人登月飛行

月球表面水的發現

其他國家的月球探測



對水星和金星的探測

對水星的期探測

對金星的期探測

對火星的探測

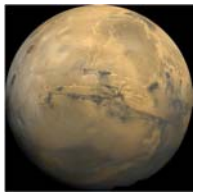
火星探測的初期階段

火星探測的中期階段

維京人號

火星探測的第三階段

機會號　好奇號



對類木行星的探測

對木星的探測

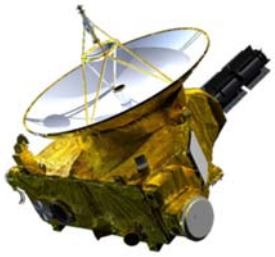
伽利略號　朱諾號

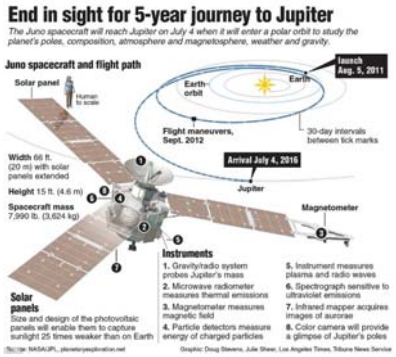
對土星的探測

卡西尼號

對天王星和海王星的探測

對冥王星和柯伊伯帶天體的探測





對太陽和行星際空間的探測

人造衛星和太空站的探測

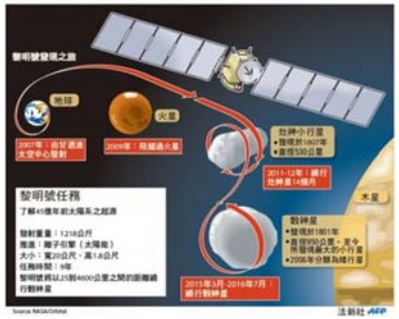
宇宙飛船的探測

對彗星和小行星的探測

對彗星的探測

對小行星的探測

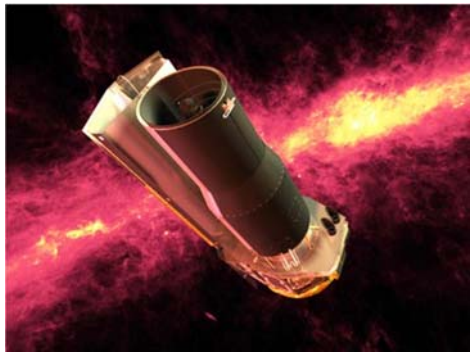
NASA探測太空船「黎明號」進入穀神星軌道



紅外波段和光學波段的太空探測

紅外波段的太空探測

光學波段的太空探測



Spitzer天文衛星

哈伯太空望遠鏡

Hubble Space Telescope

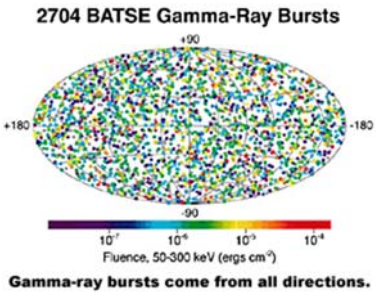
高能波段的太空探測

紫外波段的天文探測

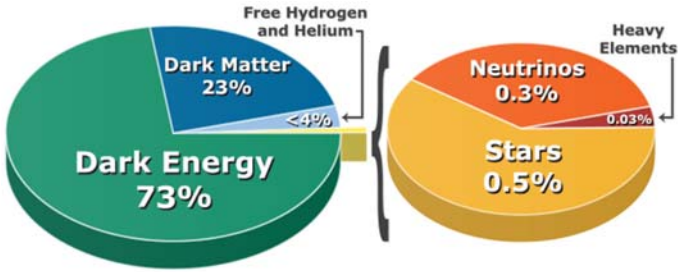
X 射線波段的探測

γ 射線波段的探測

錢卓（Chandra）X射線天文衛星



未來將如何？



暗物質

暗能量　1998年　發現宇宙加速膨脹

太陽系外行星

人類登陸火星？發現外星文明？

望遠鏡發展史

葛必揚

2016・10・22

1609年，義大利天文學家伽利略
Galileo Galilei 用自製的望遠鏡觀察星空，
開啟了近代天文科學的先河。

英文Telescope一字，源自希臘語中的
tele (意為“遙遠”) 和 skopein (意為“注視”)。

望遠鏡傳入中國

明萬曆四十三年（1615），陽瑪諾著《天問略》，擇要介紹伽利略用望遠鏡觀測的天文學新成果。
天啟六年（1626），湯若望在欽天監官員李祖白協助下，以中文完成「遠鏡說」，擇要介紹望遠鏡構造原理，製造方法，功能及使用方法，首次將伽利略望遠鏡介紹到中國。

也正由於此書，徐光啟將在西安傳教的湯若望調到京城，參與曆局的工作。
崇禎十三年（1640），湯若望在《曆法西傳》，首度用「望遠鏡」此一名稱。
崇禎四年（1631）十月，即有曆局以望遠鏡觀測日食的紀錄。

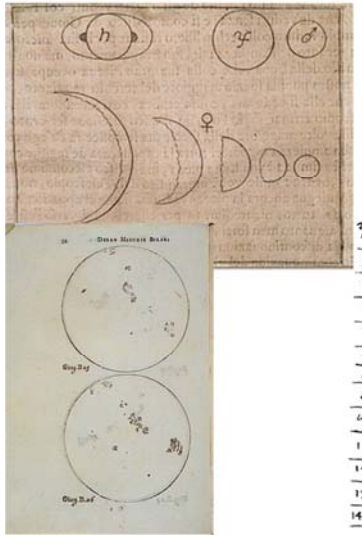
但這個望遠鏡可能並非自製，而是由傳教士從西方帶來的。

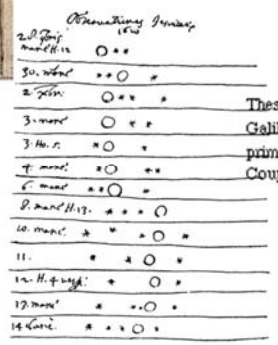
1609年，義大利天文學家伽利略用自製的望遠鏡觀察星空，開啟近代天文科學的先河。

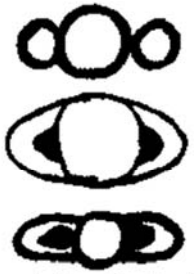
以上的敘述中，那些因素對科學發展的影響最重要？

A、1609年
B、伽利略
C、義大利
D、自製望遠鏡
E、觀察星空
F、…

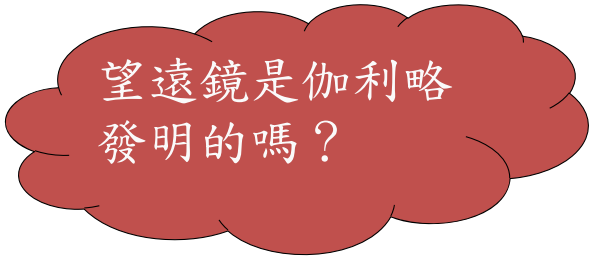
伽利略用自製的望遠鏡做了許多重要的天文觀測，改變人們對宇宙的認識。







These are sketches of three drawings Galileo made of Saturn through his primitive telescope. ("New Worlds," Couper & Henbest, p.86.)



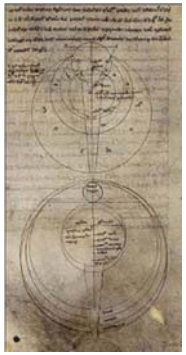
1608年，荷蘭眼鏡鏡片製造商李普希
Hans Lippershey 和他的徒弟發現：
老花的凸透鏡＋近視的凹透鏡→
→教堂的風向計似乎近在眼前！

另有一說，荷蘭驗光師查哈里斯・楊森
（Zacharias Janssen, ～1580 – ～1638）
更早發明了望遠鏡。

誰發現了透鏡
有放大功能？

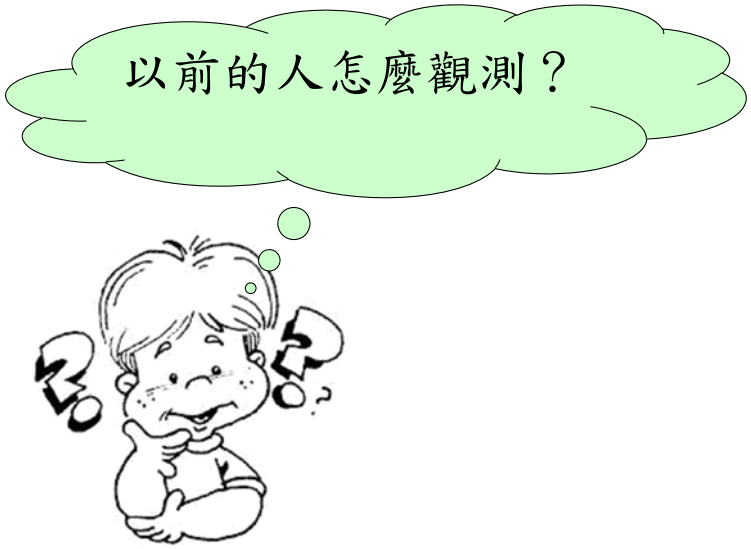
古人很早就從琥珀到發現
曲面鏡放大影像的現象，
11世紀就有閱讀石
(Reading Stone)，將打磨過的
水晶置於書上，幫助閱讀。

1268年，英國修士羅傑培根
(Roger Bacon) 最早有系統地
記錄透鏡的光學原理。



1300年前後，義大利就出現利用凸透鏡
製作眼鏡，幫助老年人改善視力。
1450年前後，凹透鏡付諸實用，有助於
改善近視。

由於眼科醫學、光學理論的進步，文藝
復興時期歐洲的玻璃工藝技術明顯進展。



古人觀測天文的工具，大致歸為三類：

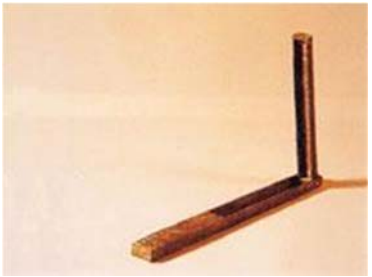
表：觀察太陽影長

鐘：量測時間

象儀：量星體位置，角度

圭表始於何時，現尚無考。
商周時代就已經有了圭表測景之法。
《堯典》：“期三百有六旬有六日”，
可看做是商末或更早的實測。

我國現存最早的圭表實物，
是1965年在江蘇儀徵一座
東漢中葉墓葬中出土的
一件袖珍銅制圭表，
它由19.2公分高的表
和34.39公分長的圭構成。

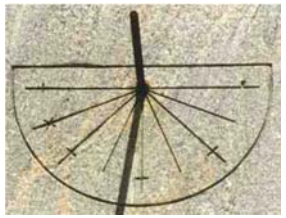


文獻中最早記載觀測冬至日的為《左傳》，
分別有兩次：

1、僖公五年（655 B.C.）：
“春王正月辛亥朔，日南至。”

2、昭公二十年（522 B.C.）：
“春王二月己丑，日南至。”

西元150年左右，天文學家托勒密（Claudius Ptolemaeus,）在《至大論》（Almagest）書中提到古老的觀測工具：表（gnomon）。



表就是一根直桿，橫面置一個盤，記錄太陽的影長與影長變化。

依照貝羅索斯（Berosus, ~280BC）的方法，改盤為凹下的球殼，可以製成日晷。

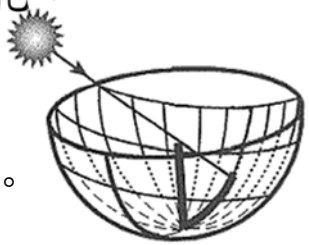
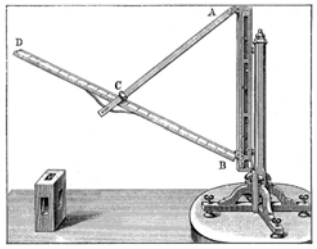


Fig 1. Schematic hemispherium - the grey curve represents the post's shadow

另有托勒密稱為“organon parallaktikon”的三角儀（triquetrum），是一個活動尺，可測量星體的天頂角距，觀測日、月的直徑。



更複雜的有“托勒密渾儀”（astrolabon），是有個環的黃道儀。

到中世紀，阿拉伯人仿製改良渾儀，也有不少貢獻。

例如：

依斯哈克（Hunayn ibn Ishāq？, ~910）

阿爾・法爾加尼（al—Farghānī, ~9世紀）

阿爾・烏加迪（Mu ′ayyad′ al - ′Urdī, ~1250）

10世紀時，他們改良紀限儀，築兩道南北平行的4m高牆，南端以拱頂相連，在離地面 12m 高的頂部開一個0.1m的孔洞，垂直放入插銷，在地面向北12m遠處，隆起土層，架上木板，在木板上刻畫精度到1/10分的刻度，觀察太陽。

又如在馬拉加天文台製作大量觀測儀器，其中還可能發明了孔表。

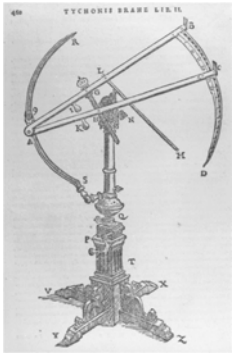
到文藝復興時期，基本的觀測工具都屬於象限儀類。

知名的人如：

維也納的普爾巴赫（Purbach, 1423~1461）與他的學生雷吉奧蒙塔努斯（Regiompntanus, 1436~1476）

德國的阿皮安（Peter Apian, 1495~1522）

以及大名鼎鼎的第谷（Tycho Brahe, 1546~1601）



波蘭天文學家赫維留
（Johann Hevelius, 1611~1687）

赫維留可稱得上是
“古典觀測”的最後一人，
他一心以第谷為師，盡心
製作出精確的儀器。
1673年，寫《天文機械》
（Machina Coelestis）傳世。

自望遠鏡問世，天文學家都想擁有
望遠鏡，不少人開始製作望遠鏡，
用以觀測以往沒看過的星空。

1610年秋，刻卜勒（Johannes Kepler, 1571~1630）也設計出天文望遠鏡。

1618年前後，巴伐利亞耶穌會士沙伊納（Christoph Scheiner, 1575~1650）製造了觀測日斑的投影望遠鏡。

此後，人們開始研製較大的玻璃透鏡。

1630年後，望遠鏡開始用於角度測量。

1637年，赫維留也製造了望遠鏡；
1643年他用兩架望遠鏡觀察月亮和太陽。

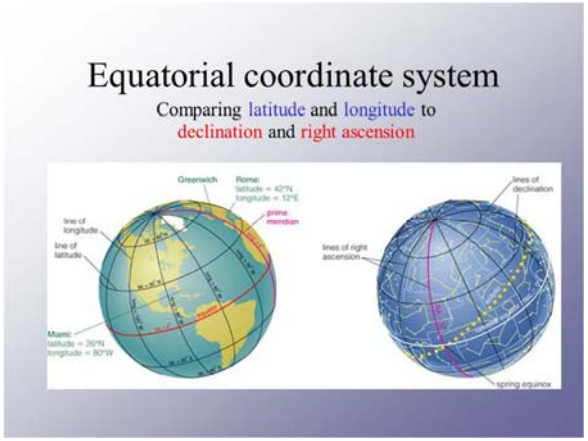
但他卻拒絕在測量儀上加入望遠鏡使用。

1679年，英國科學家哈雷（Edmund Halley, 1656～1742）與赫維留進行觀測較量。

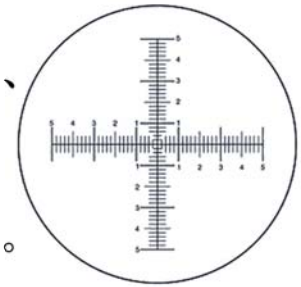
結果哈雷承認，
他用望遠鏡無法區分相距一分的兩顆星，
而赫維留用古典儀器卻能分辨相距半分的兩顆星。

但是，屬於望遠鏡觀測的時代，
終究還是來臨。

值得一提的是，從16世紀開始，
歐洲的天文學家逐漸開始轉用
赤道座標系。

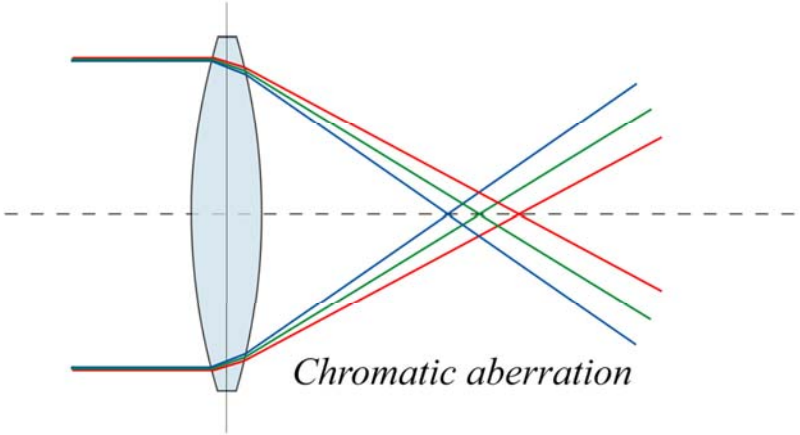


望遠鏡效能的一項重要改良，
是在物鏡的焦平面上使用標記、
網格和細線。
它們能使望遠鏡具有更優越的
分辨功能與更精確的測量功能。



約在1630年，義大利天文學家熱內里尼（Francesco Generini, 1593~1663）可能在望遠鏡的焦點處使用細線和網格。
1641年12月，英國天文學家蓋斯科因（William Gascoigne, 1612~1644）聲稱在象限儀上用了細線。

但透鏡構成的折射式望遠鏡有個很大缺點：色差。

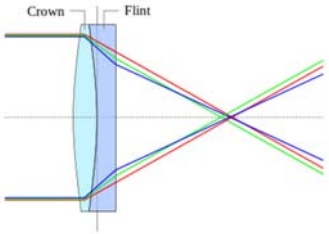


17世紀，天文學家為了消除色差，競相把望遠鏡造得特別長，增長望遠鏡的焦距。

為了避免過長的鏡筒產生的不便，荷蘭科學家惠更斯（Christiaan Huygens, 1629~1695）根據法國天文學家奧祖（Adrien Auzout, 1622～1691）的建議，製造“空管望遠鏡”(aerial telescope)。

後來，科學家學會製造直徑大、焦距短的透鏡，縮小了望遠鏡的尺寸。

18世紀，英國律師兼業餘發明家切斯特霍爾（Chester Moore Hall, 1703~1771），想到利用凸透鏡聚光加上凹透鏡色散的結合方法，抵銷色差。



1733年他安排製造商製作，但被承商洩漏，光學儀器商杜朗德（John Dollond, 1706~1761）獲知後做深入研究，率先造出組合鏡，並取得專利。

1758年，杜朗德向英國皇家學會提成果報告，3年後被選為皇家學會會員。

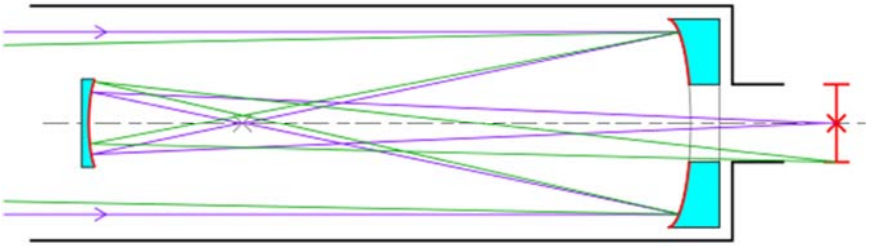
霍爾 vs 杜朗德：

杜朗德算剽竊嗎？

誰的貢獻大？

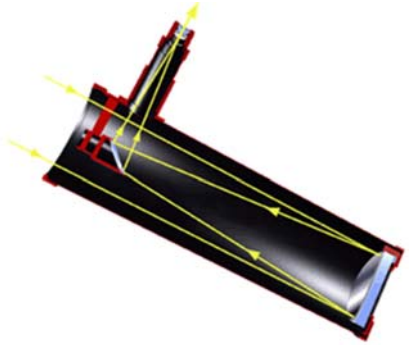
望遠鏡的下一個里程碑式的巨變是什麼？

1663年蘇格蘭數學家、天文學家格雷格里（James Gregory, also spelled James Gregorie, 1638～1675）提出彌補色象差的想法：反射式望遠鏡。

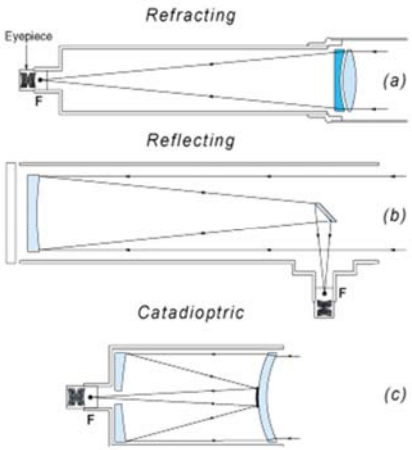


1668年，牛頓（Isaac Newton, 1642～1727）採用球形鏡面製成反射式望遠鏡。

但當時鏡面反射率很差，牛頓的鏡面光線反射率僅 16%。



之後，蓋賽格林（Laurent Cassegrain, 1629~1693）等人做了改進。
衍生設計出多種變化組合的型式!



雖然反射望遠鏡有鏡筒短、無色差等優點，但由於反射率低，直徑較大而未能立即流行。

德國化學家利比希（Justus Freiherr von Liebig, 1803 ~1873）發明了在玻璃上鍍銀的技術後，很快就利用到反射式望遠鏡的製造。

此後，金屬面反射望遠鏡就逐漸被淘汰。

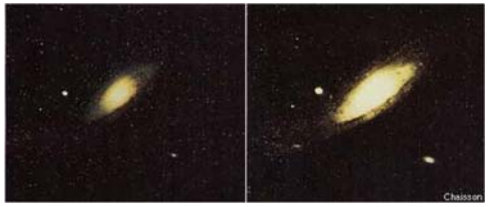
二十世紀30年代，鍍鋁技術問世後，因為鋁面比銀面不易失去光澤，反射式望遠鏡鏡面又普遍改為鍍鋁。

觀測為何要用望遠鏡？
望遠鏡有什麼優點？

望遠鏡主要功能：

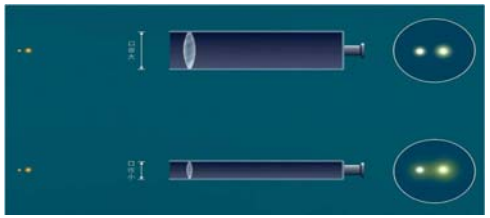
－聚光

與主鏡直徑的
平方成正比



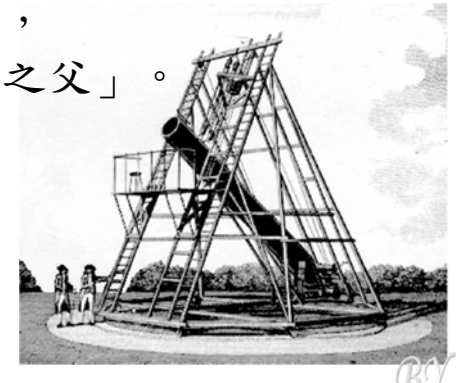
－解析

最小能分辨的
角度與主鏡
直徑成反比



所以，望遠鏡愈大愈好！

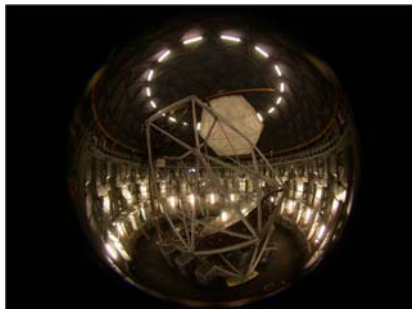
1781年，英國天文學家及音樂家威廉赫歇耳
（Friedrich Wilhelm Herschel , 1738~1822）
用自造的當時最大的望遠鏡
（口徑1.22 公尺，長12公尺），發現了
天王星，打破了古來的「五大行星」說法；
並作出多項天文發現，
被譽為「恆星天文學之父」。



BY GIR

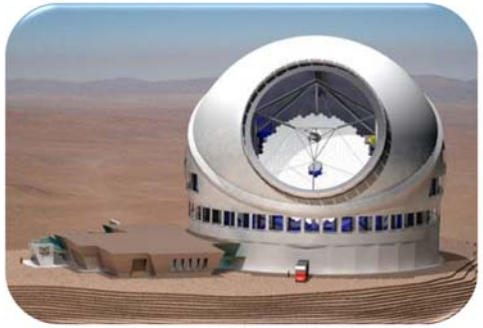
現今全球最大的光學望遠鏡

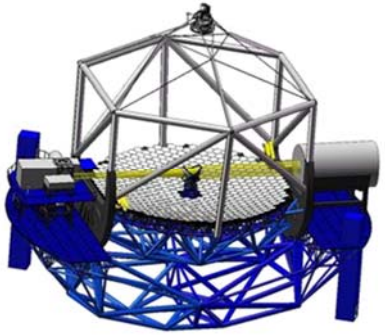
南非大望遠鏡 SALT ，口徑 11m
（Southern African Large Telescope）



新一代望遠鏡：

30m望遠鏡（TMT, Thirty Meter Telescope）
選定於夏威夷 Mauna Kea 山頂建置
預定於2018年完成





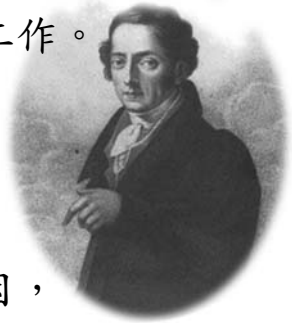
只一味追求大口徑望遠鏡，
不能解決一切問題。

觀測得到那些數據？
這些數據代表什麼物理意義？
才是更基本的問題。

重點不僅是看到，
而是看到了什麼！

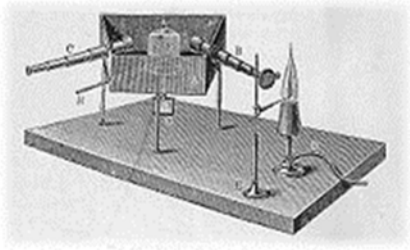
弗朗和斐（Joseph Von Fraunhofer, 1787-1826）

德國人，11歲進鏡片工廠做學徒，
之後到慕尼黑一家科學儀器公司工作。
1814年，他用自製的分光鏡發現
太陽光譜中有575條暗線，
他將其中明顯的幾條暗線以
A、B、C、D、E等字母標記。
雖然他當時不明白這些暗線的成因，
但斷定一定由太陽光產生。



後人將這些暗線稱為弗朗和斐線
1823年，到慕尼黑物理博物館，
同時接受榮譽教授頭銜。

1859年，德國物理學家克希霍夫
（Gustav Robert Kirchhoff, 1824~1887）
與化學家本生（Robert Wilhelm Bunsen,
1811~1899）發明第一架光譜儀。



建立光譜儀分析技術，
奠定元素與其光譜的對應特性，
測定8種元素的光譜。

光譜儀被稱為“科學儀器之后”。

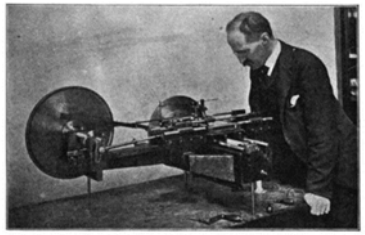
光譜儀（spectroscope）的原理：
就是繞射光柵（diffraction grating）；
用一片平面或球面反射鏡，反射面
上刻有許多平行的刻痕，稱為光柵，
使光產生繞射現象。

光柵的解析度（產生的光譜線的明暗
與寬窄）取決於單位距離內的刻線數
以及刻線間的均勻等距。

美國物理學家羅蘭 (Henry Augustus Rowland, 1848 –1901)

1876年擔任 Johns Hopkins
大學物理系首任系主任。
1899 到 1901年間，出任
美國物理學會首屆會長。
1890 年美國國家科學會頒授
Henry Draper Medal 給羅蘭，
表彰他在天體物理上的貢獻。

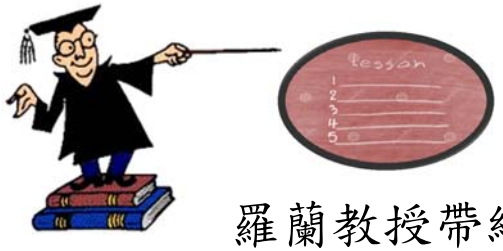
羅蘭製作的光柵：



Professor Rowland's Dividing Engine.

2 inch × 4~5 inch 範圍，刻出
每 inch 有14400 條平行線，
每條線的寬與深一致，互相平行和等距。
為此羅蘭製做一個刻線機：
鉛製的9 inch螺絲， 每 inch 有20條螺紋，螺紋
每轉一圈，鑽石刻頭前進1/20 inch，一圈有720
齒，所以每轉一齒前進 1/14400 inch。

他用這個光柵觀測太陽，1898年發表太陽光譜
簡表。直到1928年Wilson Mt. 天文台修訂此表時
，修訂量僅1/30000 而已。精準完備可見一斑。



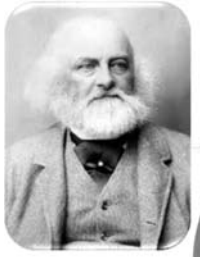
羅蘭教授帶給我們的啟發：

做大事，不要做大官。

認真、盡力地做好一件事，就是做大事。

1860年，義大利天文學家多納蒂
(Giovanni Battista Donati, 1826~1873)
首先想到將光譜儀與望遠鏡結合。
1863年發表觀測到的15顆星的光譜。

之後，美國天文學家 Lewis Rutherfurd (1816~1892) 與義大利天文學家 Angelo Secchi (1818~1878) 各自獨立觀測，首度依星球的光譜特性，認定恆星群聚的情形。



英國天文學家William Huggins (1824~1920) 由行星的吸收光譜，確認行星大氣中含有與地球相同的元素。

1842年，法國物理學家貝克勒爾
(Alexandre Edmond Becquerel 1820~1891)
首先將一塊銀版置放在光譜儀下太陽成像的位置，記錄到第一張太陽光譜的照片，這就是攝譜儀（spectrograph）。

發明照相術

1837年，法國人杜傑
(Louis-Jacques-Mandé Daguerre, 1787–1851)
製作第一張照片。
他稱這項發明為“銀版照相術”
(Daguerreotypes)。

銀版照相術是將一塊鍍了一層銀的銅盤，
用碘處理後，將銅盤置於黑盒子裡曝光。
然後將曝光過的銅盤用汞蒸氣還原黑色的銀，
銅盤上就顯現出在黑盒子裡捕捉到的影像。

但因為銀版照相技術複雜及成本昂貴，
所以到1851年發明了“濕盤照相術”
(Wet Plate Process)，改善了這兩個問題。
濕盤是一種在玻璃上以化學物品創造影像，
然後再轉製到紙或紙板上的一種攝影方法。
濕盤技術 1870年後開始普及，使用底片的
攝影技術即是根據濕盤技術發展而來。

電波天文學之父 詹斯基

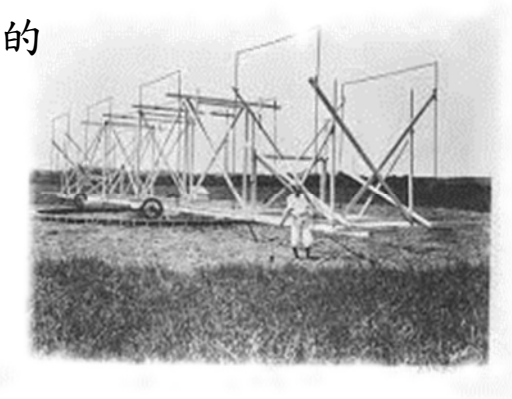
Karl Guthe Jansky（1905～1950, American）

44歲英年早逝，生前因電波天文的
成果尚未彰顯，因此並未享獲榮耀。
但時至今日電波天文的成就已獲得
4次諾貝爾物理獎。

天文學界為紀念其貢獻，將
電波輻射強度單位定為“Jansky”，
1 Jy＝10^{-23} erg／cm^2・s・Hz
並經過全球票選，將 VLA 命名為
“Karl G. Jansky Very Large Array”。

BY GIR

Jansky 於1928年進入貝爾實驗室工作，
（Bell Telephone Laboratories）
任務是改善電報傳輸的干擾。
他利用自行設計製造的儀器，
1932年全年觀測了整個天空，
確認雷雨是造成干擾的
主要來源。



但另有一個尚未被認知的干擾來源，
這個電波源的訊號穩定，
每隔23時56分出現，但強度微弱。
不久，它就被確認為是來自
銀河系中心的電波。
這個發現登上了1933年5月5日的
紐約時報（The New York Times）頭版。
也刊載在學術期刊。

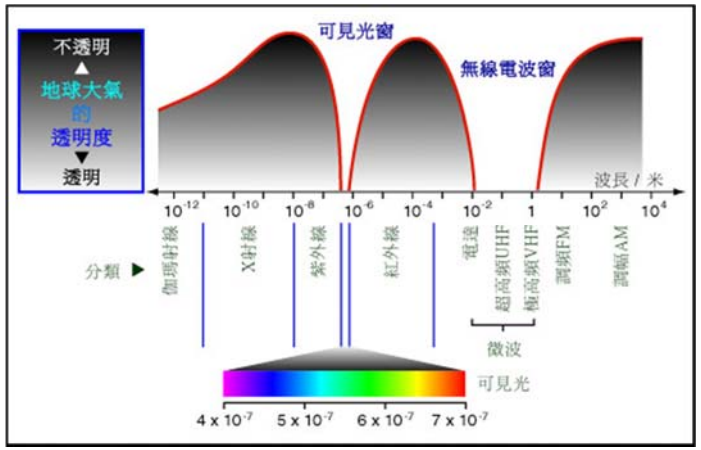
Jansky 的貢獻開啟了觀察宇宙的
另一扇“窗口”（“window”）。

類似情景歷史再現

1964/65，Arno Penzias、Robert Wilson 觀測到波長7.35 cm 對應為 3.5 K的宇宙背景輻射。紐約時報 1965年5月21日 頭版報導。

短 ← 波長– → 長

這 是 肉 眼 可 見 的 光



觀測電波波段的深層含意：

不同頻率 ＝▸ 不同溫度 ＝▸ 不同物理機制

Optical thin ＝▸ 看到內部區域

電波望遠鏡如何接收
想要觀測的頻率訊號？

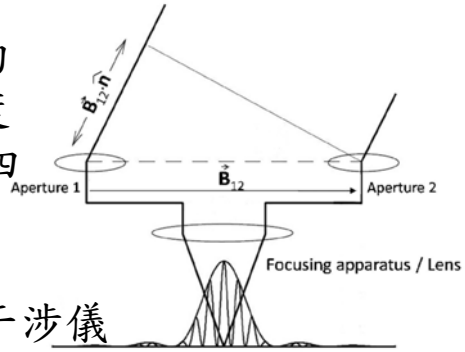
全球最大單面電波望遠鏡

500公尺球面電波望遠鏡，FAST
（Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope）

亦稱「天眼」，由4500塊反射面板組成，
中國科學院國家天文台建造。
利用貴州平塘縣天然的石灰岩地形建址，
直徑約600公尺，深達300公尺；
2007年7月計畫成立，2011年3月動工，
2016年7月完工。
貴州省政府對核心區內近萬名
居民實施整體搬遷撤離，
屏蔽5公里內所有無線電通訊。
2016年9月初步投入使用。

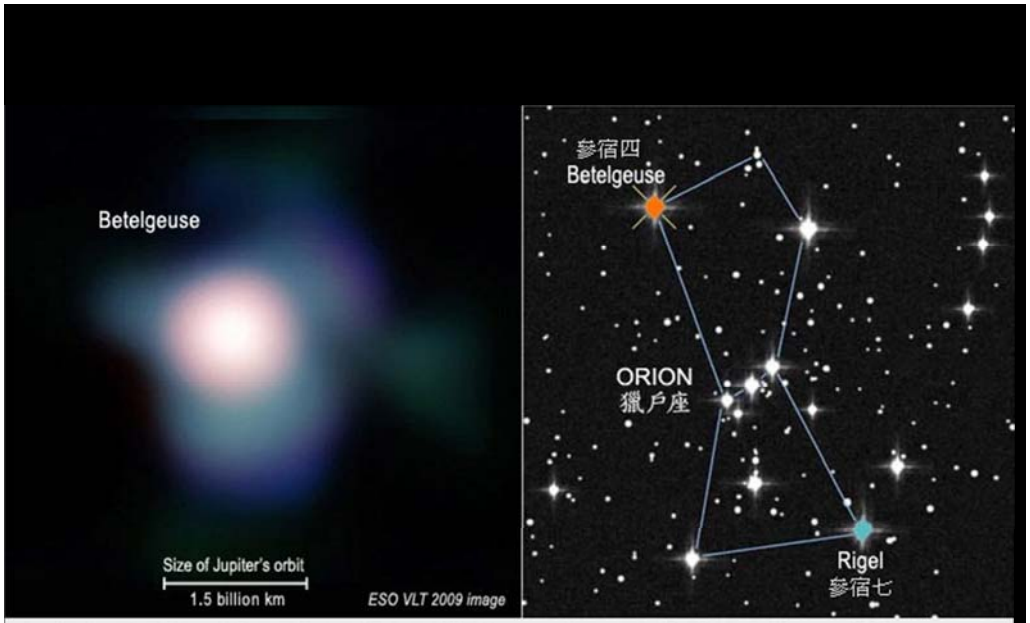
干涉儀 interferometry

1920年，Wilson Mt. 的
100 in 光學望遠鏡首度
利用干涉儀測出參宿四
的直徑。

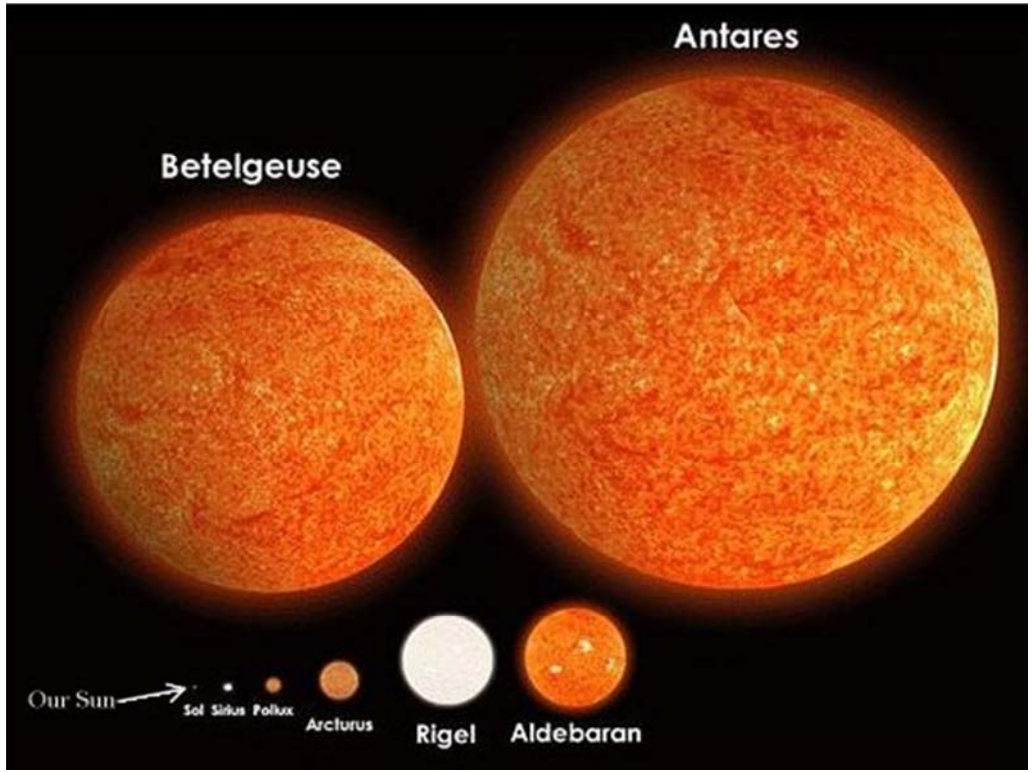


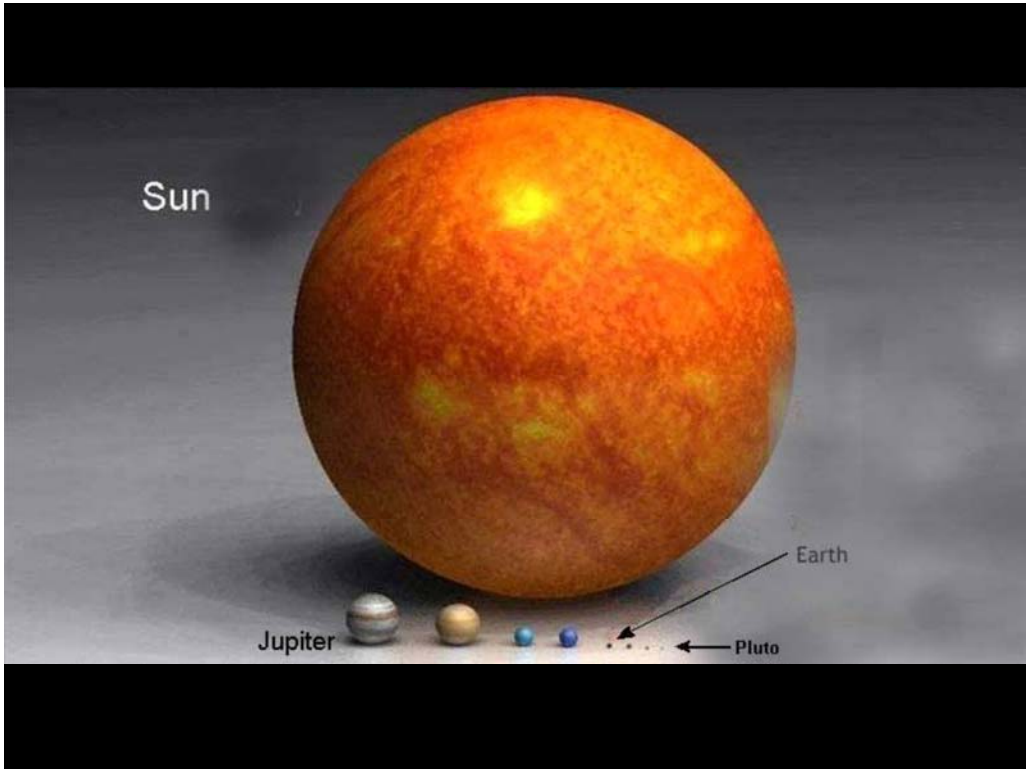
1940年代，利用電波干涉儀
測得高解析度的天體電波訊號。

1974年與1975年，開始使用數個紅外望遠鏡
（光學望遠鏡），組合成干涉儀進行觀測。



左: 參宿四的星冕 (歐洲南天文台紅外光合成照片)　右: 參宿四在獵戶座的位置，亮度變化 0.3~1.2 等

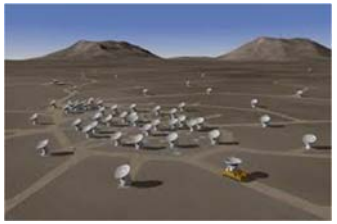




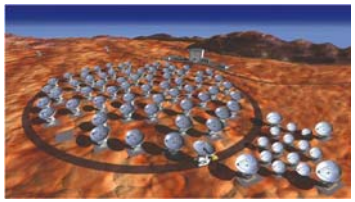
電波望遠鏡干涉陣列
VLA（Very Large Array）

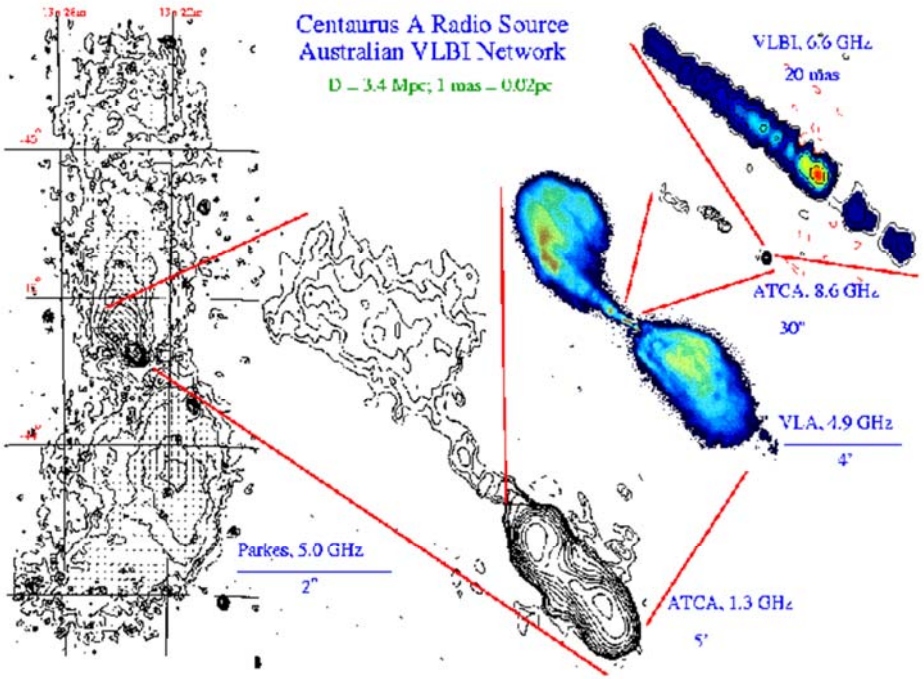
美國新墨西哥州
25 m × 27 座，展開最大時，相當於口徑36公里的單一望遠鏡。

ALMA 阿爾瑪大型毫米/次毫米陣列
(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)

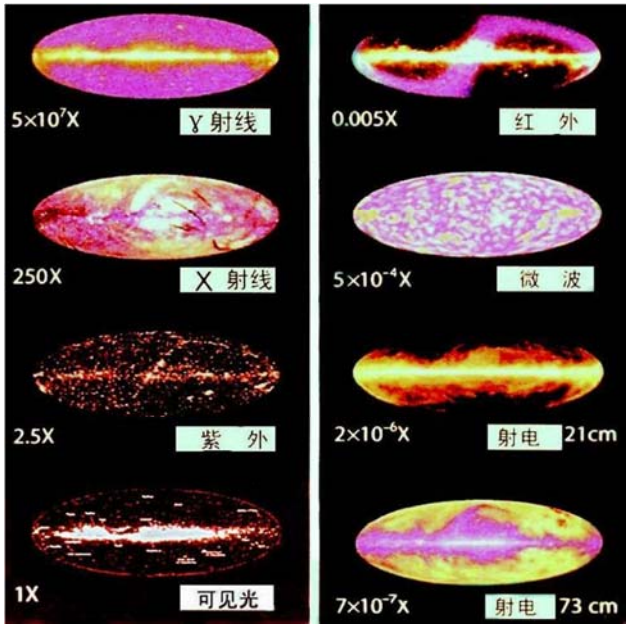


- 66 個 12 m天線的陣列，展開可至18 km，位於智利安地斯山海拔 5000 m高原。
- 美國國家電波天文台 (NRAO)、歐洲南天天文台 (ESO)、日本國家天文台 (NAOJ) 及我國中研院共同參與。
- 解析度達0.005角秒，是哈伯望遠鏡 10 倍。
- 波段介於紅外線到無線電波間(0.3～9.6 毫米)，是除了 SMA 以外的望遠鏡無法觀測的波段。
- 靈敏度是 VLA 20 倍，可觀測宇宙早期現象。





不同波段的銀河



發展太空望遠鏡的目的：

- 減少地球大氣擾動的干擾
- 觀測到完整電磁波段的輻射訊息
- 可回頭觀察地球整體狀況

1960年代，天文學家就將望遠鏡放在大氣球上，帶入天空。

OAO系列（the Orbiting Astronomical Observatory satellites）的4個軌道望遠鏡分別在1966,1968,1972年升空。
其中OAO2與OAO3在UV和X-ray波段成功地執行任務。

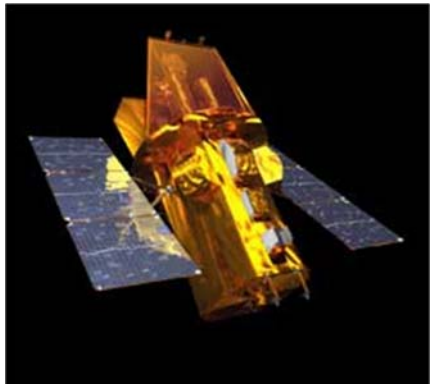
稍後在1983年觀測紅外波段的 IRAS（the Infrared Astronomical Satellite）更首度對整個天球作掃描。

1992年，可見光波段的哈伯太空望遠鏡進入軌道。

哈柏太空望遠鏡（Hubble, 光學～紫外）

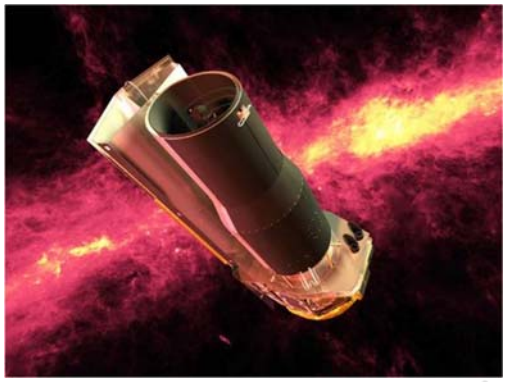
Swift（γ-ray ~ UV）

- 強而有力的γ射線爆發（γ-ray burst）偵測器
- 可偵測到100多億光年外發生的事件，對瞭解宇宙早期的歷史有幫助



- Chandra（X-ray ~ γ-ray ）
- XMM-Newton （X-ray ~ γ-ray ）

- 史匹哲紅外望遠鏡（Spitzer）
- 赫歇爾遠紅外望遠鏡（Herschel）
  - 紅外光可穿透灰塵，直擊星雲內部的狀況，對研究初生或濱死恆星、系外行星相當有用
  - 2013年停止運作



你以為這就結束了嗎？

繼續探索宇宙深處！

$$L+L$$

LHC 大強子對撞機（Large Hadron Collider）

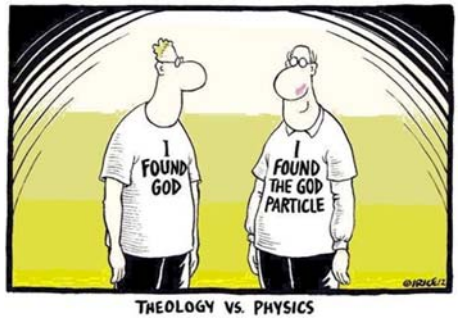
位於瑞士日內瓦近郊地下約50至175公尺之間，
是個圓周27公里的圓形隧道。
隧道直徑3公尺，貫穿瑞士與法國邊境，主要
部份位於法國。
國際合作計劃，高能物理學研究，
由全球85國多個大學與研究機構，
數千名科學家合作。
2008年9月開始試運轉，成功地
維持了兩質子束在軌道中運行，
為世界最大的粒子加速器。

2012年，CERN宣布LHC發現希格玻色子（Higgs boson），隨即2013年，諾貝爾物理獎即頒給時年已過80的英國物理學Peter Higgs（1929～）與比利時物理學家Francois Englert（1932～）。

希格子是基本粒子標準模型理論中最後一種被發現的基本粒子。
早在1964年，Higgs, Englert, 與 Robert Brout（1928～2011）提出希格機制的理論，解釋電子和夸克等基本粒子如何通過與希格子的交互作用形成質量，為宇宙形成奠定基礎。

希格子被稱為「上帝的粒子」(God particle)，
這是源自於1988年諾貝爾物理獎得主
Leon Lederman 的一本書名。

事實上，Lederman 並不喜歡
「上帝粒子」的稱號；
他更喜歡「該死的粒子」
(goddamn particle)，
因為當時沒有
辦法證實它的存在。

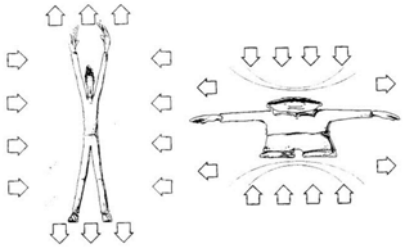


LIGO 雷射干涉重力波天文台

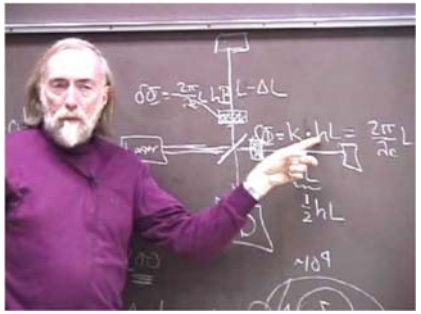
(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

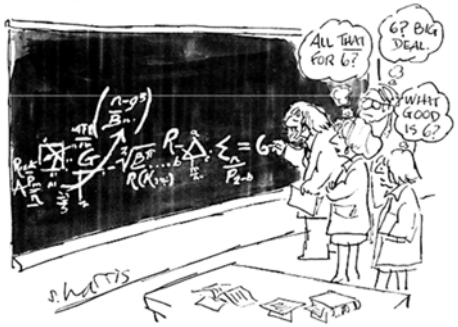
LIGO基本上就是「邁克生干涉儀」，
以雷射光束的疊加為基本運作原理。
LIGO有兩座重力波偵測器（雷射干涉儀）
，一座位在美國華盛頓州漢福區，
另一座在路易斯安那州利文斯頓市；
每一座雷射干涉儀各有兩個互相垂直、
長達數公里的管臂，
能夠比較兩道雷射光束長度。
LIGO於2002年開始運作，
2010年停機升級，
2015年2月恢復測試運轉。

2016年2月11日， LIGO 從一對互相環繞、
碰撞的黑洞，融合成新黑洞的觀測中，
首度偵測到重力波存在。
LIGO成員超過一千位科學家，
來自十多個國家。



早在1984年，美國加州理工學院的物理學家
索恩（Kip Thorne, 1940~）與同系的德雷弗
（Ronald Drever, 1931~）及麻省理工學院
物理學家韋斯（Rainer Weiss, 1932~），
就提議利用雷射干涉儀觀測重力波。





觀測遠鏡發展史

總結 調寄破陣子

一朝鏡裡凝遠，
千載華表收羅；
曲折形制爭匠運，
纖網明影細磋磨；
留像識頻波。
乍啟幽籟新章，
又增比列許多；
終得齊韻譜霄漢，
珠弦協奏未央歌；
更待雛鳳和。

105物理學史研習會(七)(八)

中國上古的曆法

台北市東吳大學外雙溪校區
一百零五年十月廿二日
高雄市立高雄中學
一百零五年十月廿九日

東吳大學物理學系
任慶運

前言

疑
為甚麼十九年「剛剛好」有七個閏月
古人如何發現十九年七閏
希臘為何比殷人晚發現七百年
十九年七閏如此簡易，何以〈律曆志〉極其艱澀
中國人是否確實只重實用不重原理

本文主要答第一疑與第二疑

順便問：為甚麼直角是九十度而不是一百度
農曆陰曆陽曆
上星期六：陽曆 105.10.15
上星期六：陰曆 丙申年戊戌月庚午日十五望

顧炎武《日知錄》說過：「三代以上，人人皆知天文。」
依董作賓《殷曆譜》，西元前一千三百多年即已知道十九年七閏。
古希臘默冬 Meton of Athens 於西元前 432 年發現十九年七閏之默冬週期。

我的疑問：
為甚麼十九年七個閏月？
古人怎麼發現十九年七閏？

再仔細說

為甚麼十九年七個閏月？

為甚麼一年三百六十五又四分之一日？

(四分曆：一歲日數以四為分母之分數之曆法)

為甚麼一月二十九又九百四十分之四九九日？

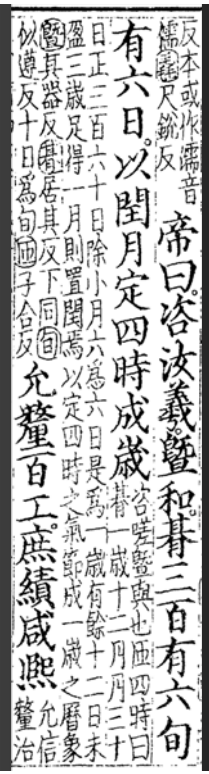
注意：不用小數點

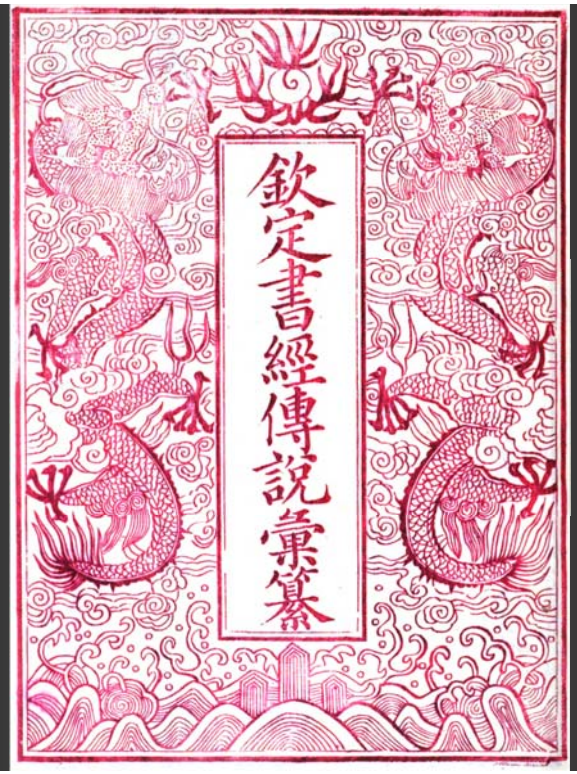
為甚麼中國古四分曆要訂定章、蔀、紀、元？

一章十九年	19
一蔀四章七十六年	76
一紀二十蔀一千五百二十年	1250
一元三紀四千五百六十年	4560

為甚麼陀螺的「點頭」(nutation)在物理上稱為「章動」？

《尚書・堯典》


帝曰咨汝羲暨和朞三百有六旬有六日以閏月定四時成歲咨嗟暨與也匝四時曰朞一歲十二月月三十日正三百六十日除小月六為六日是為一歲有餘十二日未盈三歲足得一月則置閏焉以定四時之氣節成一歲之曆象暨其器反居其反下同旬以遵反十日為旬遵子合反允釐百工庶績咸熙允信釐治



允釐百工庶績咸熙。

集傳 咨嗟也嗟歎而告之也暨及也朞猶周也孔氏安國曰朞○鄭氏康成曰中數曰歲朔數曰年中朔大小不齊正之以閏若今作歷日○陸氏德明曰十日為旬○蘇氏軾曰有六旬有六日有讀為又古文有通允信釐治工官庶眾績功咸皆熙廣也天體至圓周圍三百六十五度四分度之一。范氏蔚宗曰在天成度在歷成日○朔氏方平曰四分度之一者天行每一度計九百四十分分為四分則計四箇二百三十五分也繞地左旋常一日一周而過一度日麗天而少遲故日行一日亦繞地一周而在天為不及一度積三百六十五日九百四十分日之二百三十五。陳氏師凱曰九百四十分者歷家額設一日細數也二百三十五者即四分日之一也○朔氏方平曰天一度有九百四十分歲一日亦有九百四十分與以四分分之每分計二百三十五分是天與日所行之餘分也而與天會是一歲日行之數也月麗天而尤遲一日常不同矣近歲方氏回當至元十八年辛巳作孫君山經序有日今冬至日在箕九度昏室中由此觀之為可不用歲差決隨時迫其變而治歷以與天合故既常適時修故以與天合則執經膠泥以求與古合決所不可也○金氏履祥曰歲有差數先賢故立歲差之法以步之差法當以七十三年者為稍的月令時該一千一百七百餘年冬至日在斗二十二度昏昴中至月令時該一千一百七百餘年冬至日在虛七度昏昴中至木朝初該一千一百七百餘年冬至日在斗初度昏壁中今延祐又經四十餘年而冬至日在箕八度矣昏亦壁中以此驗之誠有不同○潘氏士遴曰凡測星沿地命名規而圜之徑五十步一尺七寸四分寸之二六尺為步周三百六十五寸二分為一度以象周天之數立一表于地圭之中命曰中表不易從表之北向南而望星置一表於正南之經頭命曰游儀之表每日逐星西過以尺量其下去為表之數每一尺為一度候星以牽牛為始望星在正南之昏時為法從此以後日西過經入日昏時女星來中故牛為入度復候女星至十二日後虛星至十日後危星來故虛為十度。

案 堯時冬至日躔於虛而初昏中星寫昴今冬至日躔於箕而初昏中星則室宿中之雲雨星偏東數分餘也

帝曰。咨汝羲暨和。朞三百有六旬有六日。以閏月定四時成歲

及天十三度十九分度之七。胡氏方平曰十九分度之七者以九百四十分分為十九分每分計四十九分四捨七奇三絲六忽八秒十九分內中取七分總為三百四十六分三捨一毫五絲七忽六秒此月行一日不及天與日相離常度之餘分也歲二十九日九百四十分日之四百九十九而與日會朱子曰天無歲只三十六旬有餘是歲自一周而復始日月皆從角起天亦從角些子起日則一日一周依舊只在角上天則一周了又過角些子起日累生去則一年便與日會。十二會得全日三百四十八箇二十九日也。餘分之積又五千九百八十八箇四百九十九分也。如曰法九百四十而一得六。陳氏師凱曰以九百四十為一法而之法除五千九百八十八得六不盡三百四十八箇九百四十為六日也。黃氏瑞節曰將餘分五千九百八十八除之六日外餘三百四十八分也。通計得日三百五十四。陳氏師凱曰有全日三百四十八日累生去則一年便與日會。十二會得全日三百四十八日三百六十者一歲之常數也。陳氏師凱曰歷家設此為常額多於此者為盈少於此者為虛故日與天會而多五日九百四十分日之二百三十五者為氣盈。胡氏方平曰氣則二十四氣自今年冬至至來年冬至前一日計三百六十五日四百三十五分是於三百六十日外多五日二百三十五分者為氣盈月與日會而少五日九百四十分日之五百九十二者為朔虛。胡氏方平曰朔則十二月朔自今年十一月初一至來年十一月初一前一日計三百五十四日三百四十八分是於三百六十日內少五日五百九十二分者為朔虛合氣盈朔虛而閏生焉。金氏履祥曰閏所以消其盈而息其虛也。故一歲閏率則十日九百四十分日之八百二十七。黃氏瑞節曰將日行所多五日五日又五百九十二分通得十日又二百三十五分合月行所少又八百二十七分一歲之閏率也三歲一閏則三十二日九百四十分日之六百單一。五歲再閏則五十四日九百四十分日之三百七十五。胡氏方平曰三歲一閏積氣朔之數三箇十日八百二十七分計三十二日六

百單一分。五歲再閏積五箇十日八百二十七分日一百五歲內無再閏而易歲乃有五歲再閏之文者蓋以氣盈六日朔虛六日而再閏在六歲內者舉本數也在六歲內者舉成數也。黃氏瑞節曰十九歲七閏合十九


欽定四庫全書　卷一　堯典　十九

之一。在天爲一度。在歷爲一日。是以天周卽歲周也。東晉虞喜分天周爲三百六十五度二十六分。乃四分之一有餘。定歲周爲三百六十五日二十四分半。元郭守敬考古準今。定天周爲三百六十五日二千四百五度二千五百七十五分。歲周爲三百六十五日二千四百二十五分。然天周歲周俱用奇零。勢難齊一。惟邵子元會運世以三百六十爲率。蓋天周爲起數之宗。天度既整。然後以整馭零。爲法較易。故今時憲曆定天周爲三百六十度。度爲六十分。分爲六十秒。秒以下。俱以六十遞析。而歲周爲三百六十五日二四二一八七五。日爲十二時。時爲八刻。刻爲十五分。分爲六十秒。秒以下。俱以六十遞析。二四二一八七五當十二時中二時七刻零三分四十五秒。歷代以來。雖餘分多寡稍有增損。要皆本乎堯典之成數而修明之。至月與日會而有合朔。日與天會而有分至。其中氣朔策之不齊。而氣盈朔虛之數以生。乃置閏以通之。使四時咸得其正。此堯典之法所以爲萬世之規範也。

帝曰。疇咨若時登庸。放齊曰。胤子朱啟明。帝曰。吁。嚚訟。可乎。

集傳 此下至鯀績用弗成。皆爲禪舜張本也。疇。誰。咨。訪問也

13

曆算因其內容龐雜演算繁瑣
學者向來視為畏途

本文只談最基本之八個字六個數：
歲實、朔策、章、蔀、紀、元

歲實：一歲日數 $= 365\frac{1}{4}$

朔策：一月日數 $= 29\frac{499}{940}$

章：19　蔀：76　紀：1250　元：4560

最重要的兩個原則
仰觀俯察
只用整數

15

只用整數

16

古四分術的完整敘述見於《後漢書・律曆志》
范曄撰著於(劉)宋元嘉九年(432)。
然依董作賓《殷曆譜》殷人已知四分術之歲實與朔策。
其《中國年曆簡譜》始於殷盤庚十五年丁巳，
西元前一三八四年。
四則運算、分數通約，在西漢輯成之《九章算術》仍屬非常高階之數學難題。
使用小數點之小數遲至梅文鼎之《曆算全書》仍稱為「畸零數」。
殷人斷無可能領先後世一千二百年使用分數甚至小數計算。
因此古曆中歲實與朔策之計算必然只用整數。

~1800

~1200

古算用「籌」，清初梅文鼎《曆算全書》詳說筆算，仍有專章論籌算。
籌算非常複雜，以籌計算分數之加減乘除，求之於殷商之際，殆無可能。
故無法除盡之數，用乘倍以得整數。
此即創用「章蔀紀元」紀年法之原委。
因此古曆乃趨向整數之曆法；
以小數求其數值之計算乃背道而馳。
《莊子・天下》「百家往而不反，必不合矣。後世之學者，不幸不見天地之純、古人之大體，道術將為天下裂。」
其斯之謂歟。

純，整數；裂，小數；
大體：章、蔀、紀、元。

仰觀俯察

殷人得知四分術歲實朔策之方法無他：
《易・繫辭下》
「仰則觀象於天，俯則觀法於地。」

觀甚麼象？觀甚麼法？
象：
晝夜交替，朔望盈虧，寒暑更迭，日月離合。
法：
立杆見影，長短伸縮。

以上象法六句話，句句都確有所用。

這個部分分為初級版與高級版：

初級版：計算方法

高級版：公理建構

初級版

基礎部分 (每年日數每月日數) 需九九乘法。

進階部分 (章蔀紀元) 須知六除以三等於二。

基礎部分 ：每年日數、每月日數

中國 (古代) 曆法最基本的一個常識：

十九年置七個閏月

兩個重要的法數（參數）：

歲實：一歲日數 $= 365\frac{1}{4}$

朔策：一月日數 $= 29\frac{499}{940}$

這四個魔數 (magic numbers) 怎麼來的？

童稚皆知之兩個現象

每月月有盈虧，初一月晦朔

每年日有長短，冬至日最短

進階知識

初一傍晚，月隨日西沉；(十一月二日)

十五傍晚，月望日東昇。(十月十五日)

冬至正午日影最長。

如何定陰曆月之朔望？

如何定陰曆朔望？

朔：陰曆初一

望：陰曆十五

因此陰曆初一稱為「朔」，十五稱為「望」。

如何定陰曆初一十五？

觀察月相（phase）

對吧？

我的疑問：

三十、初一差不多

十四到十六差不多

如何確定是哪一天

月相 → 初一、十五 → 朔、望

我從小到大都被這樣誤導

所以剛才也這樣唬弄閣下

古人把朔稱為初一（不是把初一稱為朔）

把望稱為十五（不是把十五稱為望）

朔、望 → 初一、十五

朔望

《說文》「朔，月一日始蘇也。」

(漢) 劉熙《釋名・釋天》
「朔，蘇也；月死復蘇生也。」
「望，月滿之名也。日在東，月在西，遙相望也。」

楊樹達《高等國文法》言語之起源　以業為名之例

陰曆初一，傍晚時，月隨日西沉。(十一月二日)
陰曆十五，傍晚時，月望日東昇。(十月十五日)

觀察（甦）朔（日月相）望　必無猶疑
一天都不會錯
一天都不能錯
否則殷曆至今一百三十幾萬日何以能
「不斷、不疊、不錯亂」（高平子）
星象模擬

童稚皆知之兩個現象

每月月有盈虧，初一月晦朔

每年日有長短，冬至日最短

進階知識

初一傍晚，月隨日西沉；(十一月二日)

十五傍晚，月望日東昇。(十月十五日)

冬至正午日影最長。

兩個基準：

「朔」為一月之首，「至」為一年之首。

以下「至」特指冬至。

兩個觀測：

一、雖然冬至正午日影在一年之中為最長，
次年冬至正午日影並不回復原長。
四年之後冬至正午日影回復原長。

二、即使歲首冬至恰好逢朔亦為月首，
次年冬至並非月首逢朔。
十九年後冬至又逢月首朔旦。

由第一個觀測，發現四年共一千四百六十一日。故一年 (應該說「歲」) 日數為

$$\frac{1461}{4} = 365\frac{1}{4}$$

這個數字稱為「歲實」。「四分術」即是指四分之一。

由第二個觀測，發現十九年共二百三十五次逢朔，也就是共有 235 個月。十九年總日數為

$$19 \times \frac{1461}{4}$$

故每月日數為

$$19 \times \frac{1461}{4} \div 235 = 29\frac{499}{940}$$

這個數字稱為「朔策」。

但是每年十二個月，十九年只有 228 個月；實際觀測應有 235 個月，多了七個月。

這些多餘的月稱為「閏月」（閏者餘也），須安置於十九年中，其法則稱為「置閏」。

此即歲實、朔策、十九年七閏之原委。

進階部分：章、蔀、紀、元

中國 (古代) 曆法最基本的另一個常識：

用干支紀日紀年

四個重要的名稱：章蔀紀元

一章十九 年

一蔀四章 (76 年)

一紀二十蔀 (1520 年)

一元三紀 (4560 年)

為甚麼創這四個用魔數（magic number）定義的紀年法？

中國文明領先全世界最早使用分數，不用小數。

0.333333333333333333333333333… 還只是三分之一的近似值。

十九年總日數不是整數，是分母為四的分數：

$$總日數 = 19 \times 365\frac{1}{4} = 19 \times \frac{1461}{4}$$

為了去分母，所以乘以四。

十九年稱為一章，乘以四，四章稱為一蔀。

一蔀共七十六年，1461×19 日：

$$總日數 = 1461 \times 19 = 19 \times 487 \times 3$$

中國文明獨步全世界，用干支計日計年。

「領先」者，還有後繼者；

「獨步」者，望塵莫及矣。

倘殷人紀日而不用干支，殷代曆法將亦無從談起矣。

董作賓《殷曆譜》

距民元前已有一百三十三萬餘日，約得三千六百四十八年的不斷不疊不錯亂之紀日法。此無疑是世界各民族所有最整齊而最長久存在的紀日法。

高平子〈曆法約說上篇中國諸曆約說〉

也。高平子氏中國曆法約說云、

中國曆法中尚有一極重要之原素，則甲子紀日法是也。蓋年月日，以及節氣等之長度本身相比，原無公約之數，且其相與之比數，亦隨各家所測定而有疏密之不同。因而在年中月中之日序，不能不隨曆法而異。甲子紀日，則以六十為一周，周而復始，無間斷，亦無奇零。故推算曆法者，皆以甲子為不變之尺度，攷古者亦藉甲子以定古代月日之真距。否則經過七八十次之改曆，古代歲月，殆已不可復理矣。

高氏此論極透闢，干支紀日在歷史上之價值，實緣于此。倘殷人紀日而不用干支，殷代曆法，將亦無從談起矣。

干支紀日，其起源當自有史以來，今尚不能詳考。殷代則由殷庚以至帝辛，卜辭中，固無一辭不以干支紀日也。今姑以武丁時之十二月庚申月食為定點，詳見下編支食譜（月食四）自此庚申，迄于民國元年一月一日丙子，（儒略周日二四一九四〇三）已用之至

三千二百二十二年，

一百一十七萬六千四百九十七日

之久，而不間斷，不重疊，毫無錯誤，此本譜可為之負責證明者。是誠世界最長久之紀日法也。

補充說明

西方有「儒略日」 (Julian day) (Herschel 1849)
也是不斷不疊不錯亂之紀日法。

因干支紀法以六十為周期，一蔀之年數日數雖已是整數，皆非六十之倍數，其甲子皆不齊整。先求日干支之甲子完整無缺，須再取二十蔀成一紀，使紀之日干支之甲子完整。

但一紀之年干支之甲子仍有缺餘，更取三紀成一元，使元之年干支之甲子完整。

一蔀日數：$1461 \times 4 = 487 \times 4 \times 3$（缺 20）
一蔀年數：$76 = 19 \times 4$（缺 3、20）

一紀日數：$487 \times 4 \times 3 \times 20 = 487 \times 4 \times \mathbf{60}$
一紀年數：$19 \times 4 \times 20$（缺 3）

一元年數：$19 \times 4 \times 20 \times 3 = 19 \times 4 \times \mathbf{60}$

所需之高級數學：六（十）除以三等於二（十）

小結

曆法之章、蔀、紀、元，主要目的在乘倍以期日數與年數為整數，並使其數為六十之倍數。

載籍詳述四分術始於《後漢書・律曆志下》，當時仍僅用分數，不用小數。

論曆之作因除法得小數，以之討論歲實、朔策、章、蔀、紀、元，皆乖原旨，背失其要。

高級版

建構公理系統
名詞系統
命題系統

詮解古算術語

中國古曆基本要義可檃栝為「一精四兩」：
summarize

一精：以「順天應人」為精義；

天者日月天象，（章、蔀）

人者人為干支。（紀、元）

四兩：兩要素、兩基準、兩觀測、兩參數。

兩要素：置閏、干支。

兩基準：月首、歲首。

兩觀測：冬至景復、歲首合朔。

兩參數：歲實、朔策。

順天應人

「天」：日月天象；日有晝夜，月有盈虧。

「人」：干支紀法；甲子循環，週期六十。

月的盈虧反復，日的晝夜循環，皆周而復始。

但是各有各的週期，而且都不是整數。

使用古四分術的殷人有沒有可能去算兩個分數的最小公倍數：

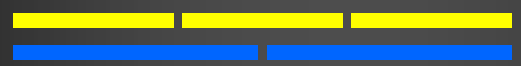
$$365\frac{1}{4} \text{ 與 } 29\frac{499}{940} \text{ 的公倍數} = ?$$

不可能會算，但是不用會算。

數學的秘訣：只要能用看 就不要用算

例如：求下列兩個長度的最小公倍數：

解法：把頭對齊，各自頭尾銜接，看何時再對齊：



歲實與朔策是兩個分數，以代數符號表示：

$$\frac{q_1}{p_1}, \frac{q_2}{p_2}$$

現代人會認為殷人遇到兩個數學難題：

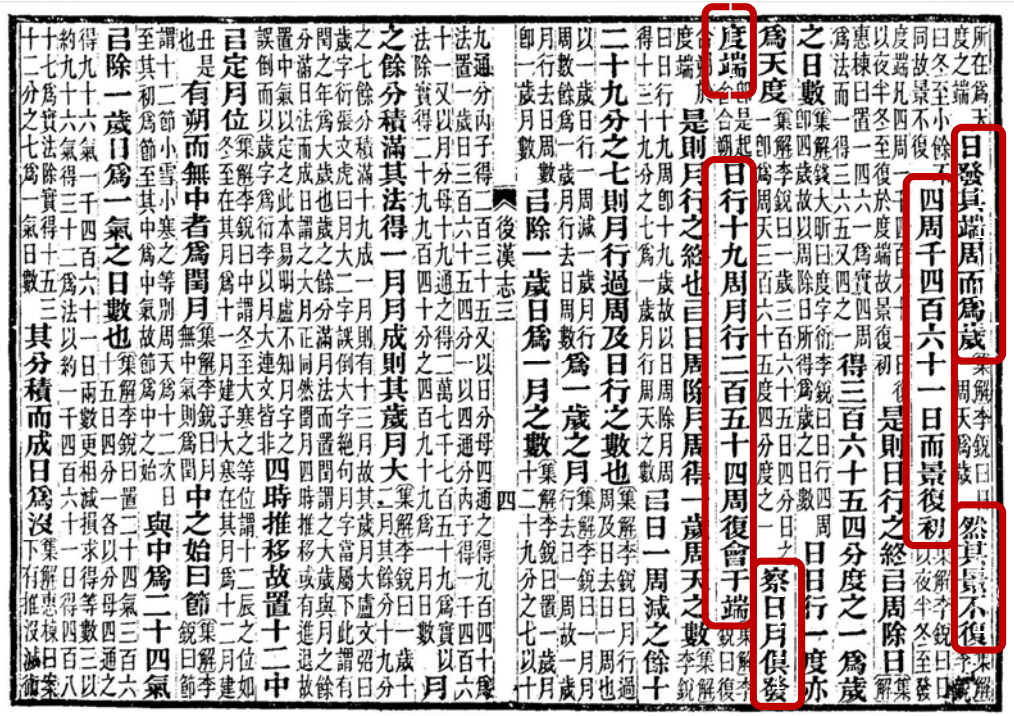
一、是否一定有公倍數？

二、有的話，怎麼得到？

答案：根本不是問題，不用算，用守株待兔法！

只要在歲首(冬至)等月首(朔旦) (月兔)出現，讓歲首與月首對齊；然後再守株待兔，等下一個朔旦 (月兔) 在冬至出現即可。

我認為這才是殷人在西元前一千七百多年發現十九年七閏的方法。



歲首：冬至；月首：朔旦。

曆元：冬至與朔旦同一天。(對齊)

看：何年何日冬至逢朔

用觀測的術語：

正午表圭影最長(冬至)，傍晚月隨日西沉(朔旦)

結果：寒暑一十又九，朔望二三五回

年歲不同：

十二月為一年

十九年只有二百二十八月 $(19 \times 12 = 228)$

十九歲有二百三十五月，比十九年多七個月

這就是十九年 (應該稱歲) 置七個閏月的理由。

「年」與「歲」如何區分：

年齡用歲數：用陽曆，虛歲實歲、春秋若干

過年非過歲：用陰曆

所以十九年置七閏月

完全來自於簡單觀測

不是用漢朝以後分數

公倍數的高等數學

補充說明

近代物理學由馬赫 (Ernst Mach, 1838~1916) 創立、由愛因斯坦發揚光大之操作定義 (operational definition)

簡釋

一、月之盈虧朔望顯而易見。(月首)
二、日之冬短夏長顯而易見。(歲首)
三、冬至日最短，正午時圭表景最長。(歲首)
四、然每歲冬至日中景長不同，四歲一循環。(冬至景復)
五、朔旦與冬至重合，需十九歲一循環。(歲首合朔)

以上僅三四兩項須做「最簡單」、「極重要」(高平子〈圭表測景論〉)之觀測：冬至正午立杆測影。此即「立杆見影」典故出處。

歲實及朔策即為以上三四五之立即結果。
歲實及朔策為五運六氣之基本法數 (參數)。

觀測：觀察實測。

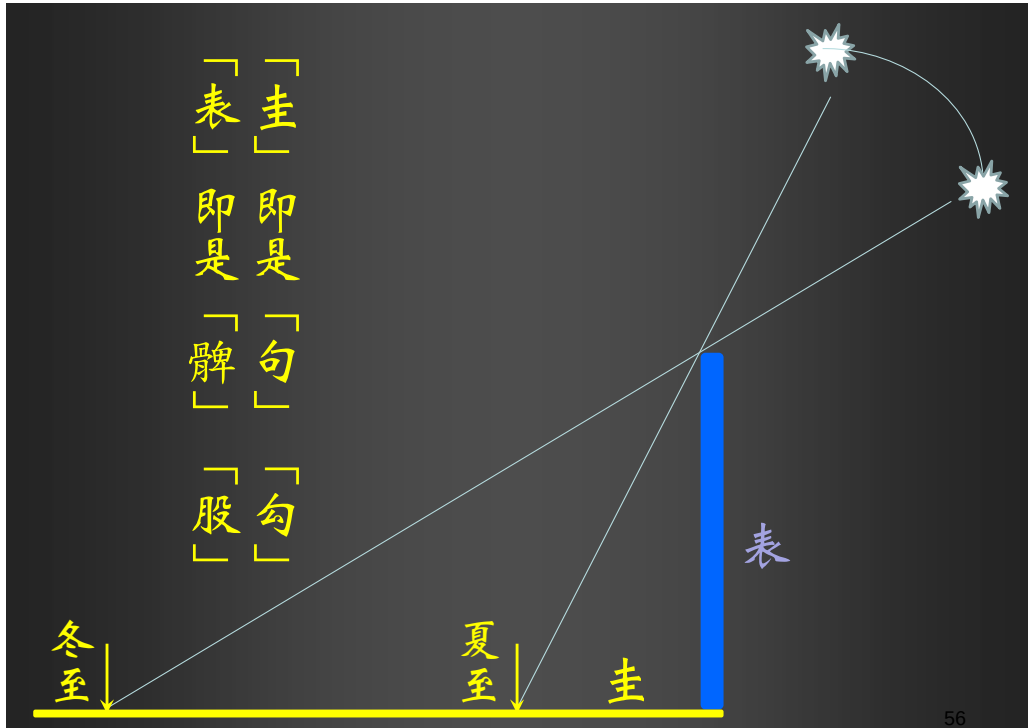
觀甚麼？測甚麼？
用俗話說，只需在平地上直立一杆，觀其影，測其長。

「我國圭表測景之法，可謂能以最簡單之儀器作天文學上極重要之應用。」

高平子〈圭表測景論〉

依高平子所述，如此簡單之儀器，其觀測可得之重要應用，竟有七項之多，令人嘆為觀止。歲實之確定，即其中之三。

比「達文西手臂」便宜多了。



王海之第五　　浚儀王應麟伯厚甫

天文

圭景

周土圭　八尺表　識景規

周禮大司徒以土圭之灋測土深正日景以求地中日南景短多暑北景長多寒東景夕多風西景朝多陰日至之景尺有五寸謂之地中凡建邦國以土圭土其地制其域注鄭司農云夏至日立八尺之表其景適與土圭等謂之地中今潁川陽城爲然正義周公度日景置五表今陽城是周公度景之處古跡猶存通卦驗云冬日至立八尺之表日中視其晷是以知用八尺表以書漢半度景也日至之景尺有五寸鄭氏注云南戴日下萬五千里地與星辰四遊升降於三萬里之中是以半之得地之中正義三光考靈曜云云疏又曰周公攝政四年欲求土中營王城故以土圭度景馮相氏冬夏致日注冬至景丈三尺夏至景尺五寸典瑞土圭以致四時日月封國則以土地注以致四時日月者度其景至不至以知其行得失也冬夏以致日春秋以致月土地猶度地

侵象鐫監闇蔽彌叙隮想　故書彌作迷隮作資　注鄭司農云煇謂日光炁也侵陰陽氣相侵象者如赤烏鐫日旁氣四面反鄉如煇狀監雲氣臨日闇日月食曹日月蔽曹無光彌白虹彌天叙雲有次序如山在日上隮升氣想煇光元謂鐫讀如佩鐫之鐫謂日旁氣刺日監冠珥彌氣貫日隮虹也詩云朝隮于西想雜氣有似可形想疏一曰侵據以爲官首中士二人史二人徒四人十等多是日旁之氣言煇亦是日旁煇光故揔以煇言之　魯史梓謹云吾見赤黑之祲　晉天文志有十煇　漢有日旁氣占　周文爲項燕軍視日服

度日視日旁氣也　漢功臣表引成帝時光祿大夫滑堪日旁占驗　崇文目雲氣圖一卷氣象圖一卷占風雲氣候日月星辰上下圖一卷雲氣則候賦占候雲雨賦各一卷　博古圖有周夔螭表座漢表座　漢太初晷儀　靈臺銅表一日晷書　圭景

漢造太初歷立晷儀　黃圖長安靈臺有銅表高八尺長一丈三尺廣一尺二寸題云太初四年造　志歷譜有日晷書三十四卷　隋志天文有黃道晷漏志一卷唐志同梁有晷漏記二卷　晉樂志炎漢中興

河南登封市告成鎮 周公測景臺 (元人所建)

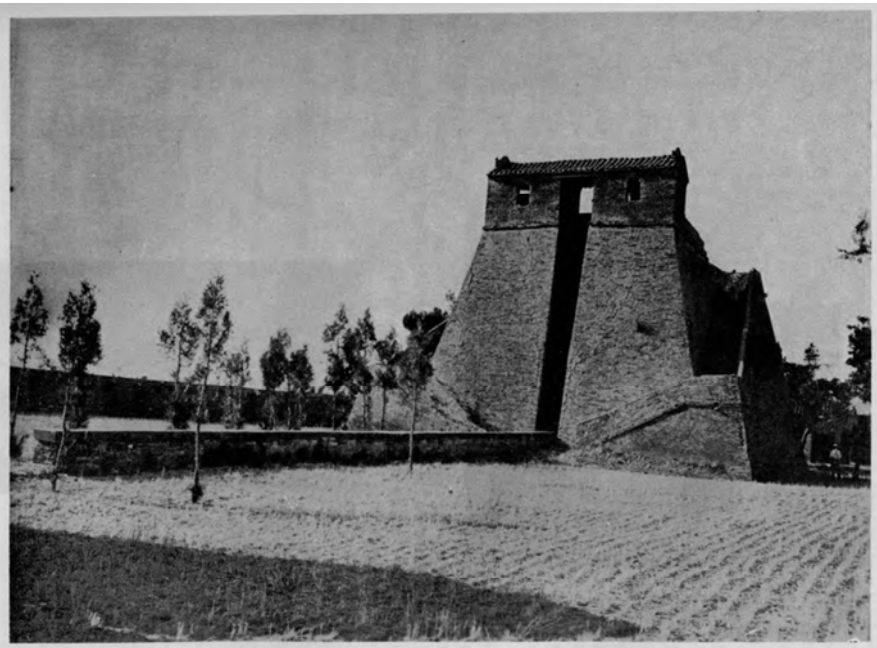


Fig. 115. The Tower of Chou Kung for the measurement of the sun's solstitial shadow lengths at Kao-chhêng (formerly Yang-chhêng), some fifty miles south-east of Loyang, considered by Chinese astronomers in ancient times to be the centre of the world (photo. Tung Tso-Pin *et al.*). In its present form the structure is a Ming renovation of the building erected by Kuo Shou-Ching about +1276 for use with the 40 ft. gnomon. This stood upright in the niche, and the shadow was measured along the horizontal graduated stone scale (for details see text). One of the rooms on the platform housed a water-clock (perhaps a water-driven mechanical clock), the other probably an armillary sphere.

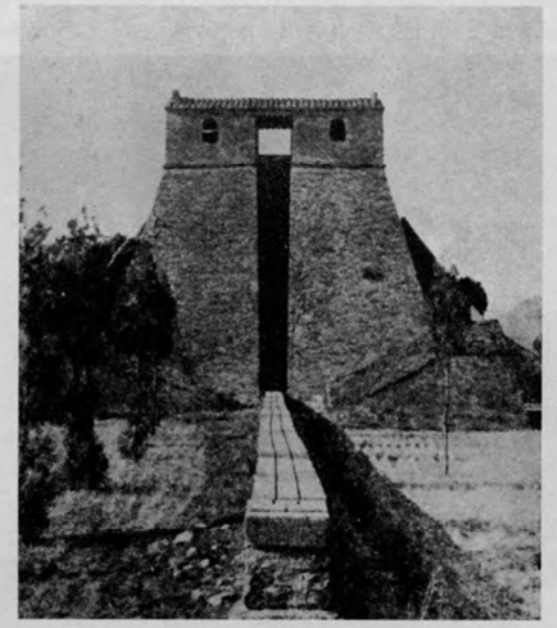


Fig. 116. The Chou Kung Tower at Yang-chhêng; looking along the shadow scale with its water-level channels (photo. Tung Tso-Pin *et al.*).

Fig. 117. The Chou Kung Tower at Yang-chhêng; looking down at the shadow scale (photo. Tung Tso-Pin *et al.*).

中華五千年文物集刊

天文篇下

一五一　河南登封元觀象臺

現在河南有登封縣告成鎮。

元至元間（一二七九）建造。

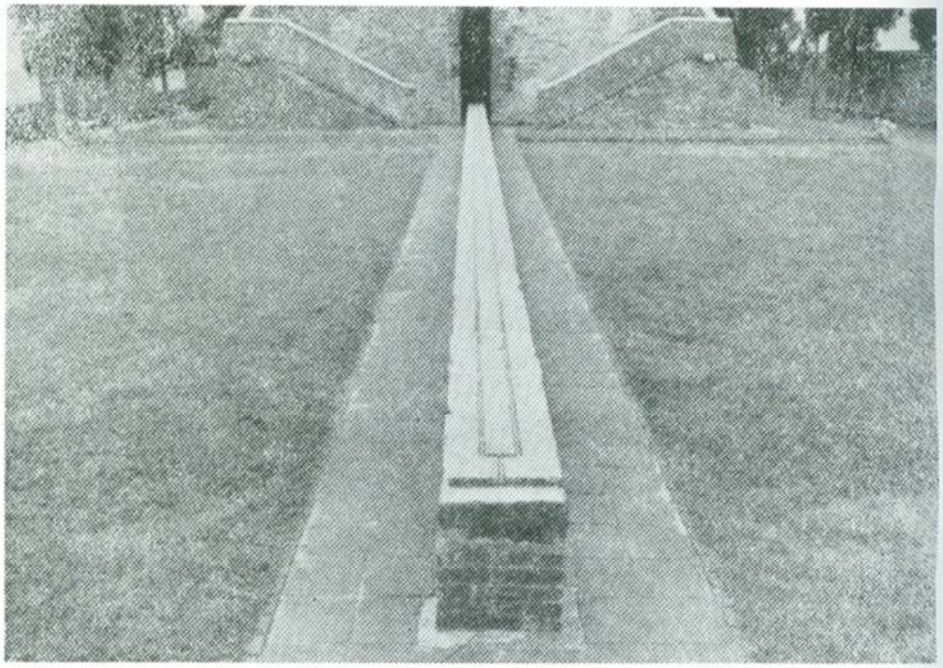
臺高九・四六公尺，「量天尺」長三一・一九公尺。

臺前存石圭三十六方組成「量天尺」，觀星臺南面與有唐代測量臺，是我國現存最早的天文臺建築。

附：一・觀星臺高表，顯得夏至、冬至倒影示意圖

二・觀星臺石圭

三・周公觀景臺



圭石臺星觀、二

補充說明

一、《殷曆譜》起於盤庚，四分術起源應更早，遠在周公建觀景臺之前。

二、如此簡單（陋）之工具（還算不上是儀器）居然可以測得相當精確之歲實（一年日數）與朔策（一月日數），沿用至今。

初級版只要用小學三年級數學求得一歲日數、一月日數。

高級版還要知道古算法的常用術語。

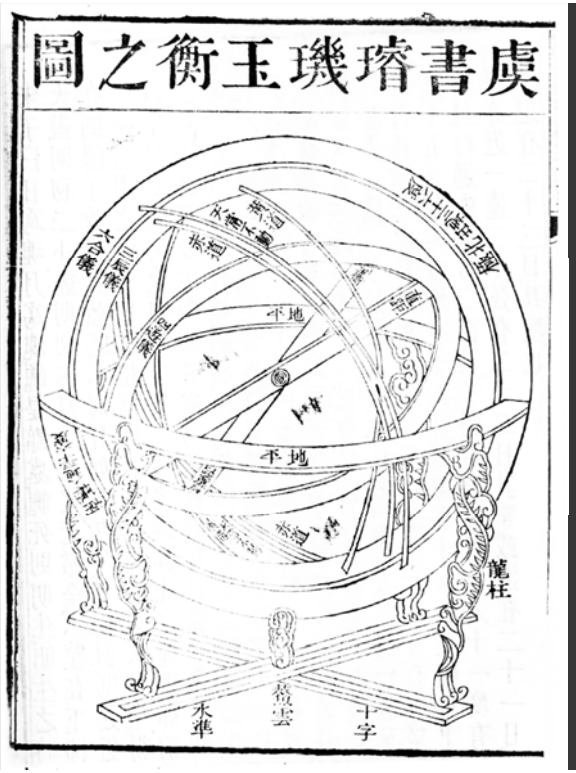
註釋

「晷」即「景」，通「影」。

「表」即《周髀算經》之「髀」、「句股」之「股」；直立。　《周髀算經》是最早的數學天文著作

「圭」即「句股」之「句」；水平，用以測量表之影長。

「句股定理」又稱「畢氏定理」，在 Eulid 的 *Elements*, Book I, Proposition 47，證明極其繁難；《周髀算經》的證明極其簡單。



PROPOSITION XLVII. THEOREM.

In any right-angled triangle, the square described on the side subtending the right angle is equal to the squares described on the sides containing the right angle.

Let ABC be a rt. angled △, having the rt. ∠ at A.

Then shall the sq. on BC=sqs. on BA and AC.

On BC desc. sq. BDEC.....I. 46.
and on BA, AC the sqs. GB, HC...I. 46.
Through A draw AL ∥ to BD.....I. 31.
meeting DE in L.
Join AD, FC.....Post. 1.

Then, since ∠BAG is a rt. ∠.....Constr.
and ∠BAC is a rt. ∠.....Hyp.
∴ GA, AC are in one st. line...I. 14.

And, since GA is ∥ to FB.....Constr.
∴ sq. GB is double of △FBC...I. 41.

Also, since AL is ∥ to BD.....Constr.
∴ ▱BL is double of △ABD..I. 41.

Again, since each of the ∠s FBA and DBC is a rt. ∠.....Constr.
∴ ∠FBA=∠DBC.....Ax. 11.
Add ∠ABC to each.
∴ the whole ∠FBC=whole ∠ABD.....Ax. 2.

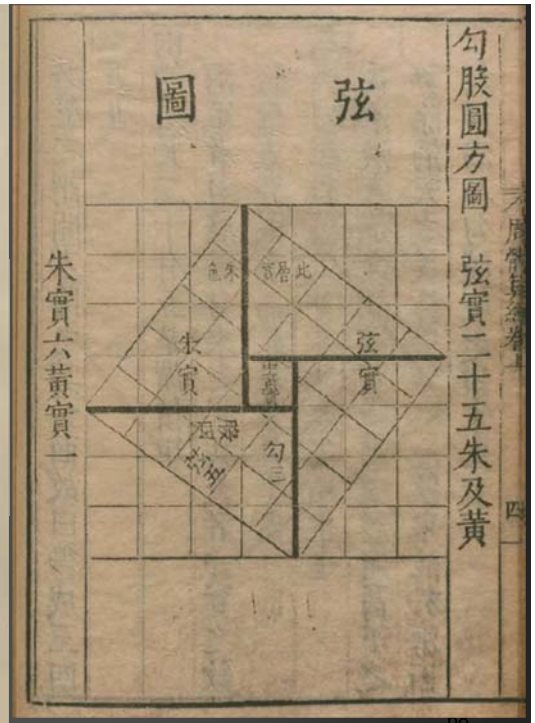
Hence, in △s FBC, ABD,
∵ FB=AB.....Constr.
BC=BD.....Constr.
∠FBC=∠ABD.....Proved above.
∴ △FBC=△ABD.....I. 4.

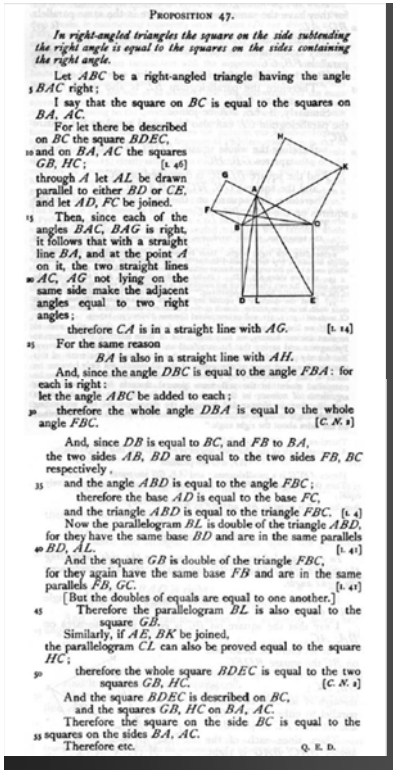
But sq. BG is double of △FBC, and ▱BL is double of △ABD .....Proved above.
∴ sq. BG=▱BL.....Ax. 6.

In like manner, by joining BK, AE, it may be proved that sq. HC=▱CL.

∴ the whole sq. BDEC=sqs. GB and HC.....Ax. 1.
i.e. the sq. on BC=sqs. on BA and AC.

Wherefore, *in any right-angled triangle &c.* Q.E.D.





PROPOSITION 47.

In right-angled triangles the square on the side subtending the right angle is equal to the squares on the sides containing the right angle.

Let ABC be a right-angled triangle having the angle BAC right;

I say that the square on BC is equal to the squares on BA, AC.

For let there be described on BC the square $BDEC$, and on BA, AC the squares GB, HC; [I. 46]

through A let AL be drawn parallel to either BD or CE, and let AD, FC be joined.

Then, since each of the angles BAC, BAG is right, it follows that with a straight line BA, and at the point A on it, the two straight lines AC, AG not lying on the same side make the adjacent angles equal to two right angles;

therefore CA is in a straight line with AG. [I. 14]

For the same reason

BA is also in a straight line with AH.

And, since the angle DBC is equal to the angle FBA: for each is right:

let the angle ABC be added to each;

therefore the whole angle DBA is equal to the whole angle FBC. [C. N. 2]

And, since DB is equal to BC, and FB to BA, the two sides AB, BD are equal to the two sides FB, BC respectively,

and the angle ABD is equal to the angle FBC;

therefore the base AD is equal to the base FC, and the triangle ABD is equal to the triangle FBC. [I. 4]

Now the parallelogram BL is double of the triangle ABD, for they have the same base BD and are in the same parallels BD, AL. [I. 41]

And the square GB is double of the triangle FBC, for they again have the same base FB and are in the same parallels FB, GC. [I. 41]

[But the doubles of equals are equal to one another.]

Therefore the parallelogram BL is also equal to the square GB.

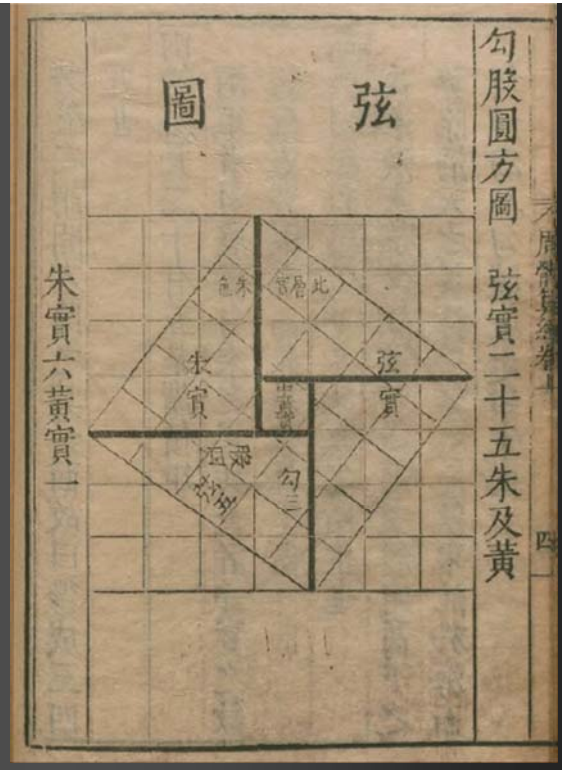
Similarly, if AE, BK be joined, the parallelogram CL can also be proved equal to the square HC;

therefore the whole square $BDEC$ is equal to the two squares GB, HC. [C. N. 2]

And the square $BDEC$ is described on BC, and the squares GB, HC on BA, AC.

Therefore the square on the side BC is equal to the squares on the sides BA, AC.

Therefore etc. Q. E. D.



冬至，日最短，景最長。
以此確定冬至，亦即歲首。
次年冬至再測景長，必不相同。
又次年冬至，景長仍不相同。
共經四年，冬至景長始回初值。
故必不可少之實測，僅在正午測日景長。

觀察月相，以朔旦為月首。

觀察正午日影；測得日影最長，即為歲首。
觀察歲首日影之長，四年一循環。

觀察歲首月相，適逢朔旦；
歲首再逢朔旦，十九年一循環。

依董作賓《殷曆譜》，殷人曆法不變之基本為古四分術，即朔策、歲實、閏法。
朔策、歲實為每月每年日數，閏法大要為十九年置七閏月。

斯乃天文曆法之普通常識，可檃栝為四句。
月以朔為首，歲以至為首。
四歲至日景復，十九歲日月復合朔於至。

名詞解釋：
至，特指冬至，日中圭表之影最長；一歲之始。
朔，月死復蘇，陰曆初一；一月之始。
合朔，日月(黃)經度相同，月在日地之間。
景，日中圭表之影；冬至景最長。

古曆兩個基本名詞及基本參數：歲實與朔策

歲實 (一歲日數)：$365\frac{1}{4}$

朔策 (一月日數)：$29\frac{499}{940}$

因為一歲日數有四在分母，以此為基本參數的曆法稱為「四分曆」。(一歲日數以四為分母之分數之曆法)

解釋名詞：實、策、歲(與年不同)、朔。
「實」「策」是數學名詞，
「歲」「朔」是物理(天文)名詞。

「策」，《漢書・律歷志上》「參之得乾之策，兩之得坤之策。」集注引蘇林曰「策，數也。」案，「策」原為細木枝，策猶籌，籌猶筭，所以計數；故引申為算得之數。

「實」「策」皆數。

歲，原為歲星，即今之木星。
《說文》「歲，木星也。」
歲星十二歲遍歷周天十二星宿，一歲一次，故以歲星計歲。

一歲日數：
後漢書律曆志下：曆數之生也乃立儀表，即圭表；冬至日中表景(即影)最長，周而為歲，然其景不復。四周千四百六十一日而景復初。得三百六十五又四分之一為歲之日數，是為歲實：

$$\frac{1461}{4} = 365\frac{1}{4}$$

朔望

《說文》「朔，月一日始蘇也。」

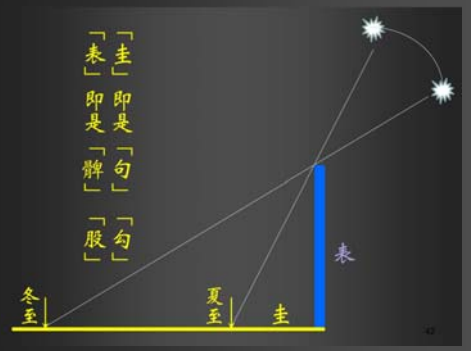
(漢) 劉熙《釋名・釋天》
「朔，蘇也；月死復蘇生也。」
「望，月滿之名也。日在東，月在西，遥相望也。」　　楊樹達《高等國文法》以業為名之例

陰曆初一，傍晚時，月隨日西沉。(九月十三日)
陰曆十五，傍晚時，月望日東昇。(九月廿七日)

小結

發現十九年七閏的方法：守株待兔

日中守株



初昏待兔

略說

希臘為何比殷人晚發現七百年
我的說法：
依照董作賓與高平子所肯定之殷曆，其關鍵在於干支紀年
從科學的角度看，「干支紀年」正是 notation 與 nomenclature 好的範例。
有此記號，才有完整可靠有系統之數據。

十九年七閏如此簡易，何以〈律曆志〉極其艱澀
我的說法
帝王藉欽天監壟斷「天道」
欽天監藉律曆壟斷學術
我想是否可以從歷代職官考察欽天監始於何時
其執掌為何
秦漢之後欽天監向皇帝提出之研究計畫，必須有新花樣，所以從簡單的置閏、日月蝕等，逐年（朝代）提出「上年積元」「五星聯珠」「日月合璧」等，這樣才拿得到研究經費，保得住飯碗。

中國人是否確實只重實用不重原理
曹亮吉：中國曆法求精確，西方曆法求實用

為甚麼直角是九十度

一周天三百六十五又四分之一度

西方比較馬虎，取近似三百六十。

我們常說：直角等於 90 度，所以圓一周 360 度。

這其實是倒果為因。

應該說：圓一周是 365.25 度，近似為 360 度，直角是圓周的四分之一，所以等於 90 度。

農曆陰曆陽曆

冬至：12.22~23

夏至： 6.21~22

春分： 3.21~22

秋分： 9.23~24

清明： 4.5~6

春假大約從青年節到清明節，都在三月底四月初

旅美時物理系在夏至會特別宣告 Summer Solstice

農曆是陰陽合曆（大家都這麼說）

我的解釋

以陰曆紀日，以陽曆授時

物理名詞天文現象

陀螺除了自轉，還會轉頭，接著會點頭。

術語：轉頭叫做「進動」或「旋進」 precession；點頭叫做「章動」 nutation。

「旋進」是自旋的同時，頭還旋轉前進。

點頭為甚麼叫做「章動」？

地球除了繞日公轉，懸在空中一如陀螺會有自轉、轉頭、(打瞌睡) 點頭。Nutation 是 nodding 的雅稱

地球點頭的週期約等於十九年，即是「一章」。

所以地球的點頭是「週期等於一章的運動」，簡稱「章動」。

這位學貫中西的譯者，是 (清) 李善蘭(壬叔) (1810~1882)。「章動」與 nutation 雅俗立判。

二十六度四十七分又阿婆媳地二尖堆其隧道與地平交角一爲二十七度五分一爲二十六度當時坐諸隧道底能見極星下過子午圈則此諸尖堆蓋爲測極星而設非漫然築之也

地軸除歲差外別有搖旋之動十九年一周名章動若無歲差則十九年中赤極必行成一小橢圜長徑十八秒五短徑十三秒七四長徑恆向黃極地軸有此動故天空諸星十九年中與赤極必乍近乍遠而分點在黃道必乍進乍退諸星之黃赤二經度必乍加乍減

地軸兼有此二動章動擠圜之長徑一章中依歲差之動

《談天五 天圖 九》

繞黃極行于小圈過若干分此若干分與圈之比若一章與歲差周時之比乃十九倍五十秒一以眞數計之設小圈徑爲二十三度二十八分則得六分二十秒赤極依此二動而行故其道非正圜亦非擠圜而成浪紋之圈圖見後天空諸曜無論或動或定皆有此二差故不能不云地軸之動蓋若惟恆星有此二差則可云恆星天如硬殼以黃極爲心而轉二萬五千八百六十八年而一周又有小動十九年而一終今日月行星俱有此二差則其故舍地軸之動不能解之矣

天空諸曜因上二動其方位時時生變故凡言諸曜之經

(321.) The *nutation* of the earth's axis is a small and slow subordinate gyratory movement, by which, if subsisting alone, the pole would describe among the stars, in a period of about nineteen years, a minute ellipsis, having its longer axis equal to 18″·5, and its shorter to 13″·74; the longer being directed towards the pole of the ecliptic, and the shorter, of course, at right angles to it. The consequence of this real motion of the pole is an *apparent* approach and recess of all the stars in the heavens to the pole in the same period. Since, also, the place of the equinox on the ecliptic is determined by the place of the pole in the heavens, the same cause will give rise to a small alternate advance and recess of the equinoctial points, by which, in the same period, both the longitudes and the right ascensions of the stars will be also alternately increased and diminished.

小結

以上所述是古四分術，歲實為 365 又 4 分之 1，朔策為 29 又 940 分之 499。

為了與其他曆法比較，也與現代天文測量的數值比較，把分數換算為小數：

歲實：365.25　　朔策：29.53085106

現代天文學所用的歲實與朔策：

歲實：365.24217879　朔策：29.5305882

四分術所用的基本觀測參數為：

四年 1641 日

十九年 235 月

依照陳遵嬀《中國天文學史》(19--)，到中華民國元年改用格列曆，一共有 104 種。

敬請指教

天文學與物理學的關係

（引言）

劉源俊 /東吳大學名譽教授

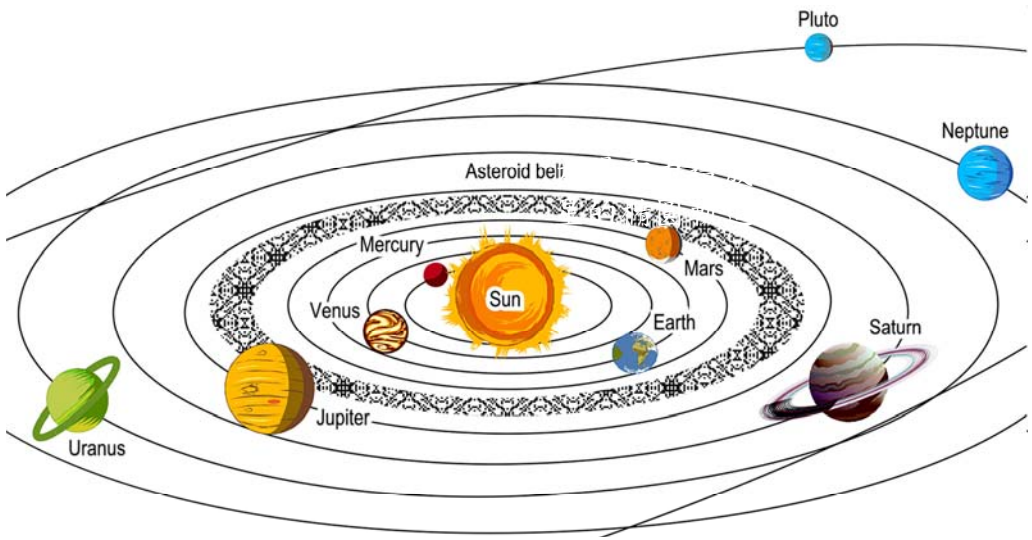
物理學史研習會（七）

東吳大學物理學系

105年10月22日

說些古典的實例

- 從刻卜勒行星運動三律到牛頓力學
- 地球、太陽與月球質量的測定
- 時間與長度單位的訂定
- 光譜研究
- 光速的測定

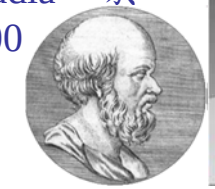


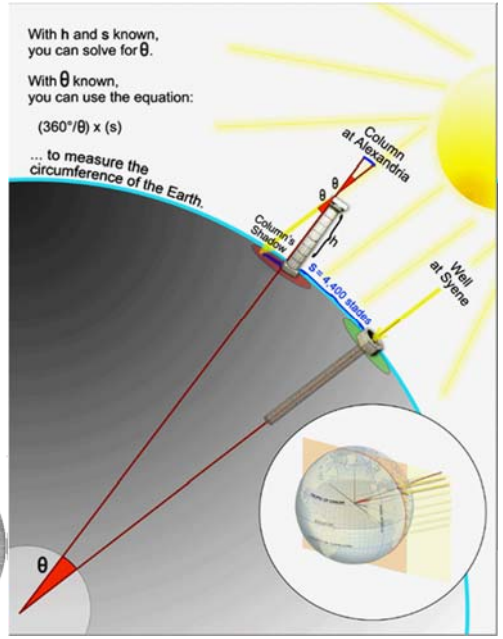
太陽系

–235 Eratosthenes 測量地球圓周長

夏至，埃及的Syene日正當中；他家鄉 Alexandria（相隔地中海）的 日照角約為圓周角的 1/50 (7˚12’) 。

設兩地在同一子午線上，估計兩地距離 5000 stadia (約 950 km)，可估得每度約 700 stadia ，於是周長為 252,000 stadia。.

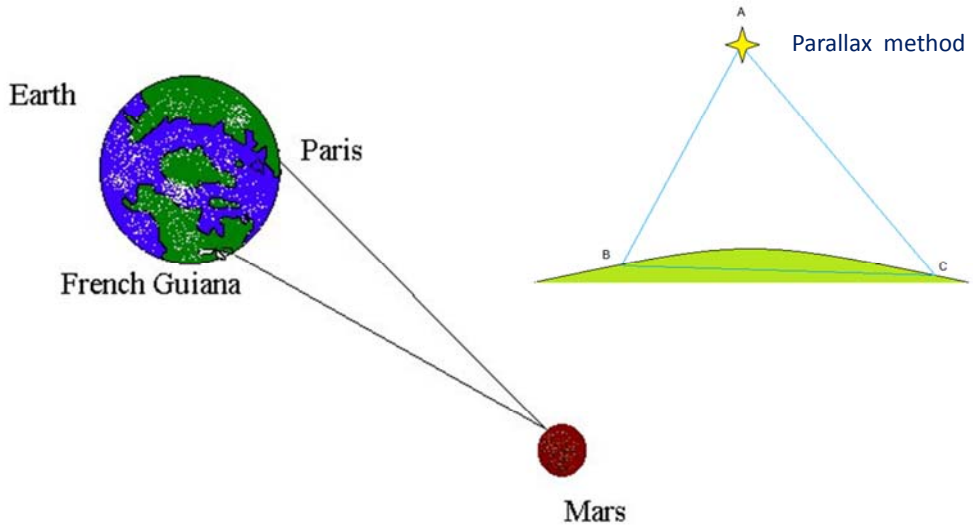




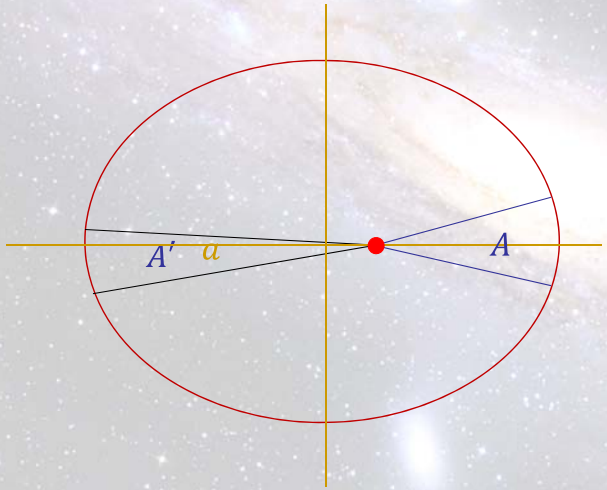
地球到月球距離

- 第一位嘗試測量月球距離的人是西元前二世紀的 Hipparkhos。用的是三角法（視差法）。
- 他測量出的距離與實際距離的誤差大約是26,000公里，或6.8%。
- 現在知道地月平均距離為 384,401 km。
- 因為太陽的距離遠太多，視差角小不容易測量，直到 Huygens 才有比較準確的值（之前的值小了十幾倍）。

Giovanni Cassini 在 1673 測量地球到火星的距離



刻普勒行星運動三律 1619



一、橢圓軌道

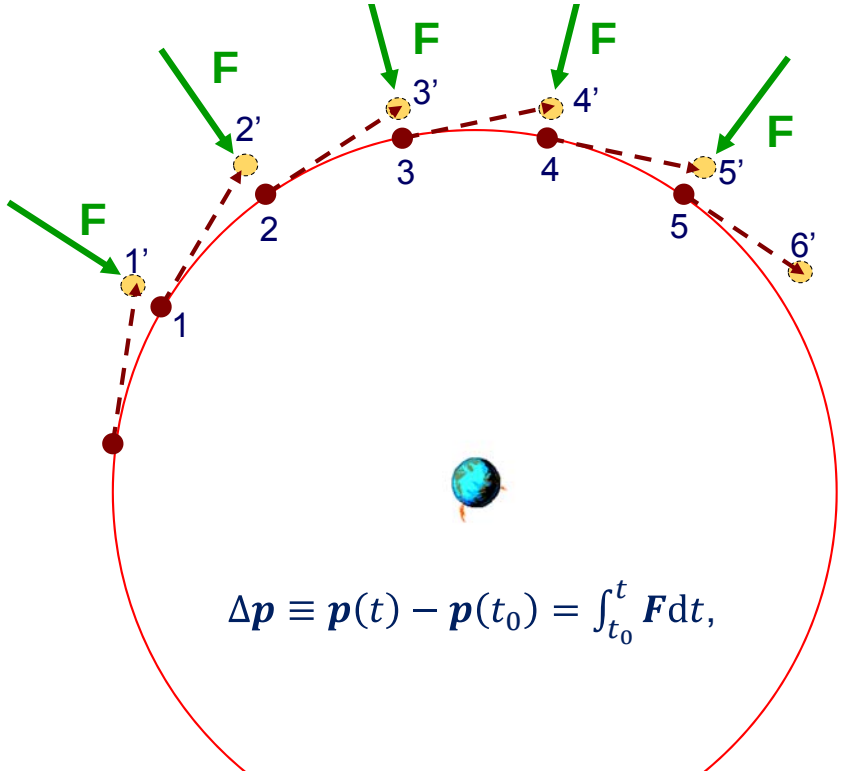
二、$A = A'$

三、$T^2 \propto a^3$

牛頓 ： （約於1696）

『那一年（1666）…我開始思考重力延展到月球軌道的問題。…我推論，維持行星在其各軌道上的力當和它們與公轉中心間的距離平方成反比。於是，我比較維持月球在其軌道所需的力與地表的重力，發現頗為符合。』

"And in the same year…I began to think of gravity extending to the orb of the Moon…I deduced that the forces that keep the planets in their orbs must be reciprocally as the squares of the distances from the centers about which they revolve, and therby compared the force required to keep the Moon in her orb with the force of gravity at the surface of the Earth, and found them to answer pretty nearly."



$$\Delta \boldsymbol{p} \equiv \boldsymbol{p}(t) - \boldsymbol{p}(t_0) = \int_{t_0}^{t} \boldsymbol{F} \mathrm{d}t,$$

- 牛頓運動第二律

$$\Delta \boldsymbol{p} \equiv \boldsymbol{p}(t) - \boldsymbol{p}(t_0) = \int_{t_0}^{t} \boldsymbol{F} \mathrm{d}t.$$

- $\Longrightarrow \boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = m\boldsymbol{a} \equiv m\ddot{\boldsymbol{r}}$
- 圓周運動：$\boldsymbol{a} = -\frac{v^2}{r}\mathbf{e}_r$
- 根據當時所知的月球距離 r_{M} 與月球的週期（28天5時28分26秒）推算，

$$a_{\mathrm{M}} = 0.00272\,\mathrm{m/s^2} \approx \frac{1}{60^2} g.$$

- 依據測量，$r_{\mathrm{M}} \approx 60\, R_{\mathrm{E}}$
- $\Longrightarrow a \propto \frac{1}{r^2}.$

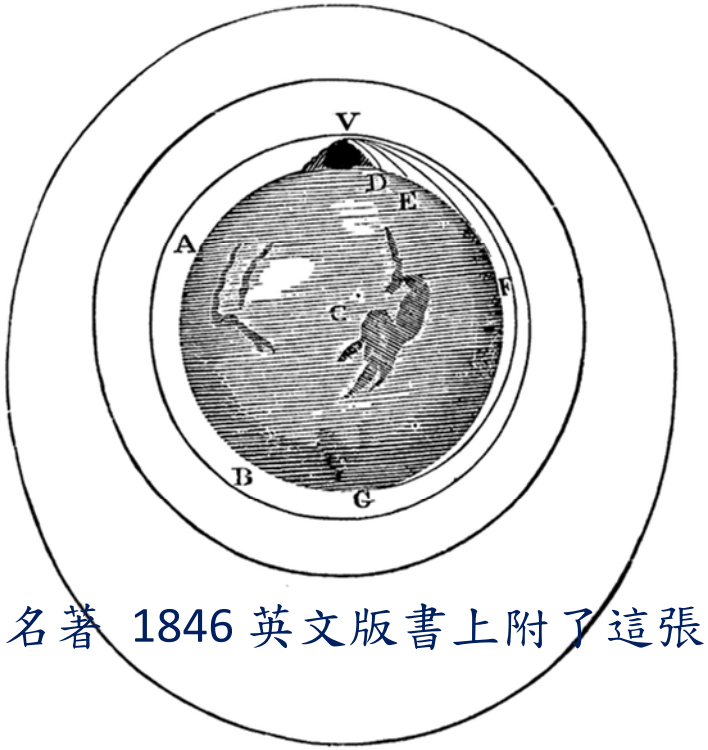
哈雷彗星的影響

- 1682 年彗星到訪。天文學家 Halley 認為其軌道是繞太陽的橢圓，週期約 76 年。
- Hooke, Wren, Halley 等人早也已猜測造成行星及彗星橢圓軌道的因素是由於太陽的反平方律吸引力。
- 1682年8月， Halley 請教算學家牛頓：在反平方律吸引力的情況下，軌道是什麼形狀？牛頓不假思索說是橢圓。為什麼呢？牛頓說是他早就算出來過。 Halley 追問，牛頓卻找不出來。
- 於是 Halley 逼牛頓寫出來。終於在1687年，牛頓寫出劃時代的物理學巨著 *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* 。

牛頓力學推演出刻普勒行星運動三律

- 萬有重力律 $\boldsymbol{F} = -\mathrm{G}\frac{m_1 m_2}{r^2}\mathbf{e}_r$
- $\Longrightarrow$ 運動方程式 $\ddot{\boldsymbol{r}} = -\frac{\mathrm{G}(m_1+m_2)}{r^2}\mathbf{e}_r$

  可推出橢圓軌道，
- 且 $a^3 = \frac{\mathrm{G}(m_1+m_2)}{4\pi^2}T^2$ 。



牛頓名著 1846 英文版書上附了這張圖

地球的質量

- Cavendish 1798 利用扭秤測得 G 值。
- 地表重力加速度 $g = \frac{\mathrm{G}m_\mathrm{E}}{{R_\mathrm{E}}^2}$.
- 已知地球半徑 $R_\mathrm{E} \cong 6.37 \times 10^6\ \mathrm{m}$，

  $g \cong 9.8\ \mathrm{m/s^2}$，

  $\Longrightarrow m_\mathrm{E} \approx 5.98 \times 10^{24}\ \mathrm{kg}$。

太陽與月球的質量

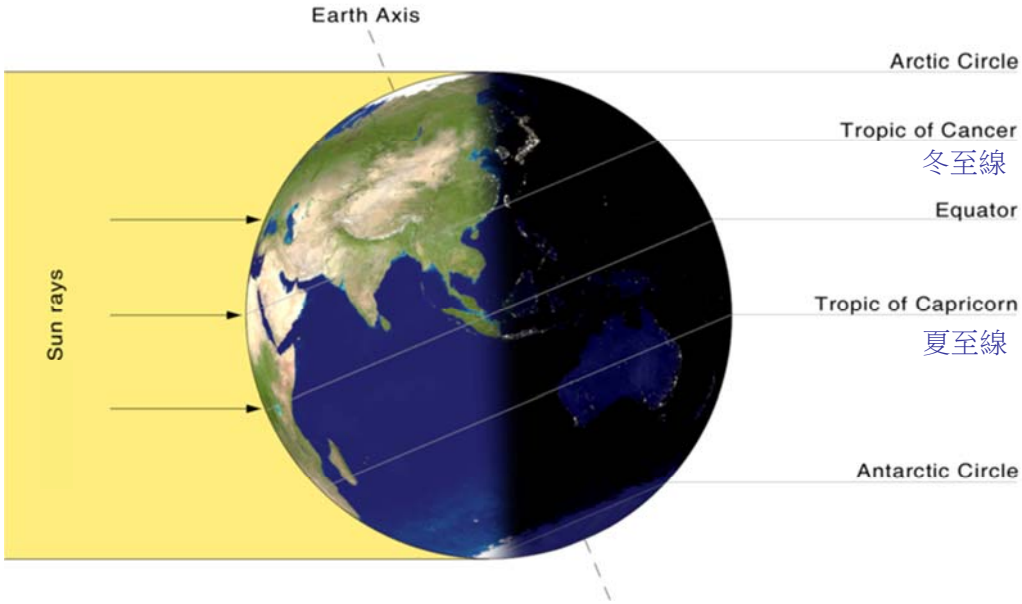
- 利用 $a^3 = \frac{G(m_1+m_2)}{4\pi^2}T^2$，
- 代入月球繞地球軌道數據，得 $m_E + m_M$，扣去地球質量，於是 $m_M \approx 7.36 \times 10^{22}$ kg，約為地球質量的 1.2%。
- 代入地球繞太陽軌道數據，得 $m_S + m_E$，但地球質量可以忽略，於是 $m_S \approx 1.99 \times 10^{30}$ kg。

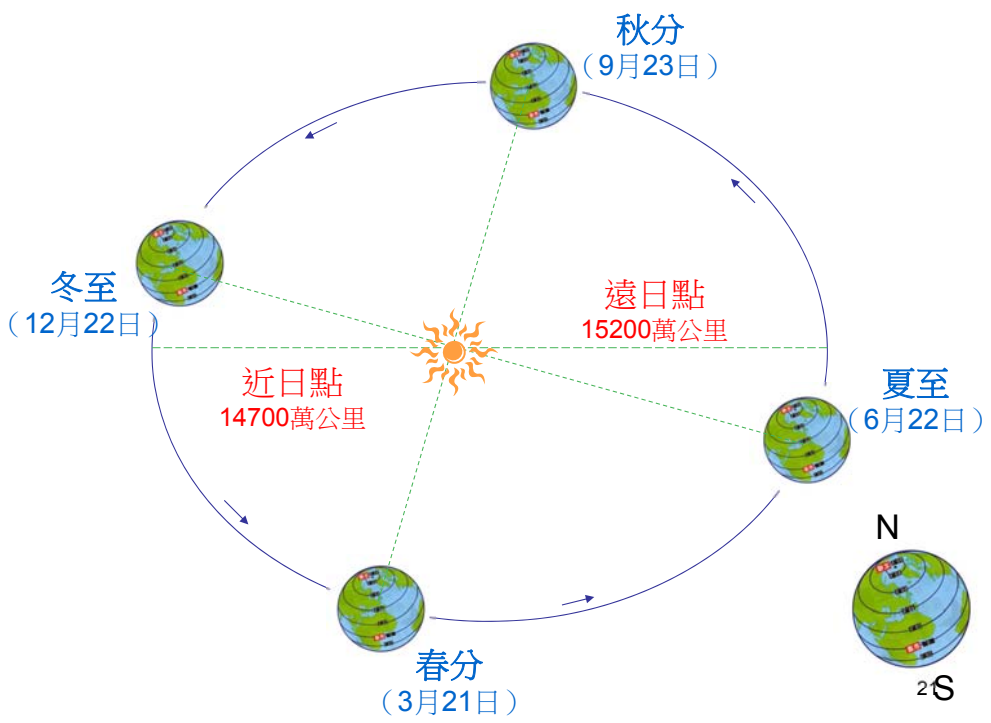
時間的測量

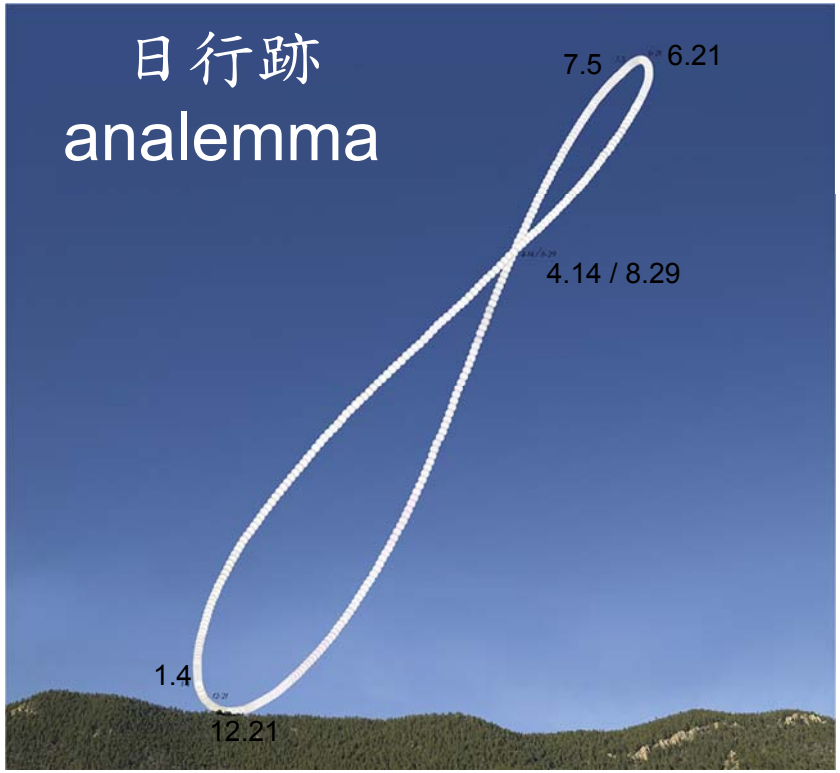
最自然而古老的鐘

自轉的地球

- 自轉一周為一日
- 以太陽為準——太陽日（日出到下一個日出）
- 以恆星為準——恆星日（星空轉一周）
- 1平均太陽日 ＝ 1.00273790935 平均恆星日（1991年）
- 1日＝24小時；1小時＝60分；1分＝60秒。



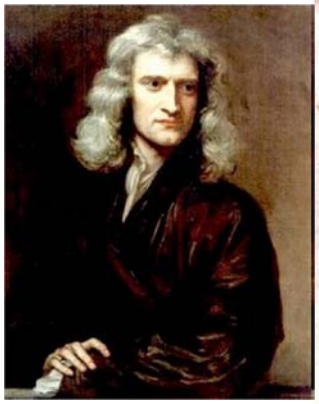


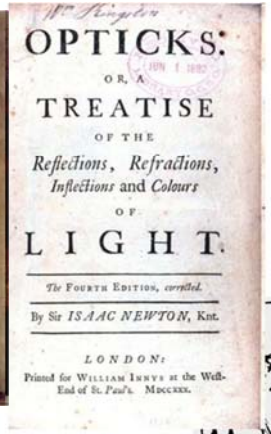


舊國際標準制（SI）訂公尺

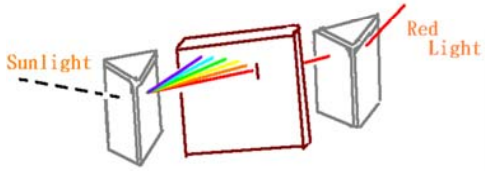
- 法國 1789年大革命後，訂 1 mètre為（通過巴黎的）子午線從北極到赤道距離的 1,000 分之 1。
- 製作標準 1 mètre 長的鉑銥合金放置在法國度量衡局。
- 後來發現測量出了點差錯（只測量子午線的一段，而竟然忽略考慮地球的扁率）。
- 還是以標準長的鉑銥合金為準。

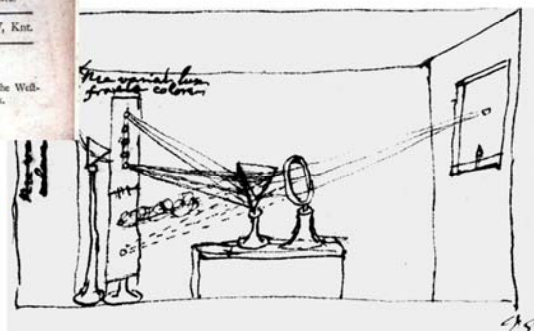
1665 Newton 光的色散




OPTICKS:
OR, A
TREATISE
OF THE
Reflections, Refractions, Inflections and Colours
OF
LIGHT.
The Fourth Edition, corrected.
By Sir ISAAC NEWTON, Knt.
LONDON:
Printed for William Innys at the West-End of St. Paul's. MDCCXXX.

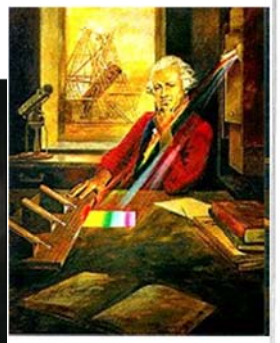
太陽光束經稜鏡生色散。所分出來的單色光再經稜鏡則不生色散。

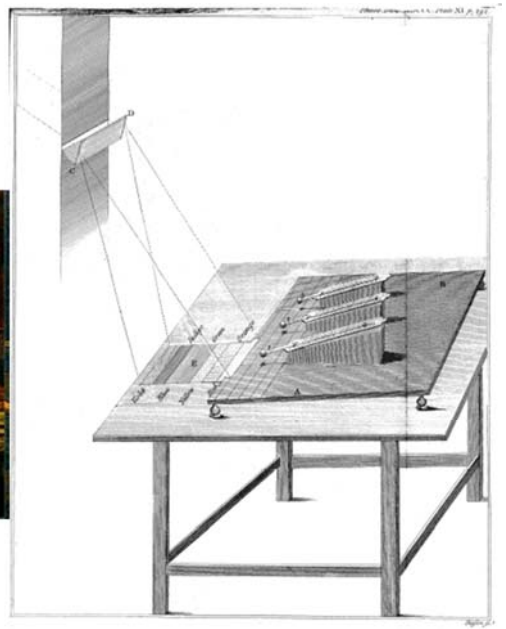




1800 Herschel 發現紅外線

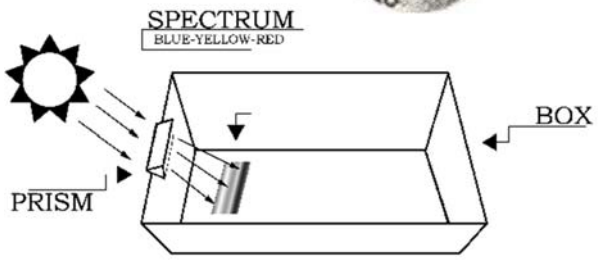
利用稜鏡與溫度計
發現紅外線。





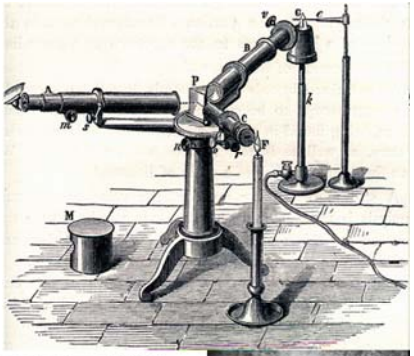
1801 Ritter 發現紫外線

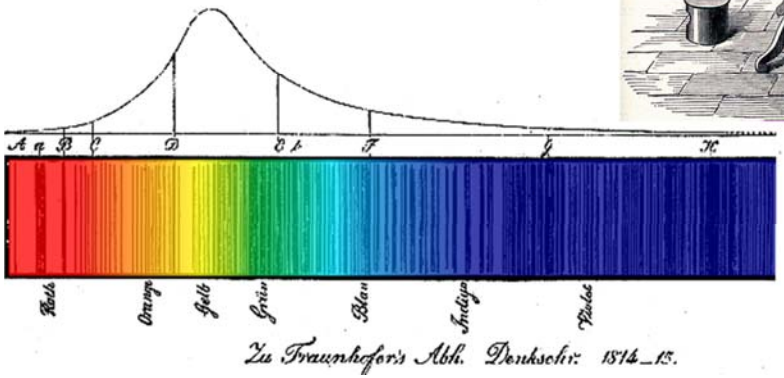
紫外線能使氯化銀
底片感光。



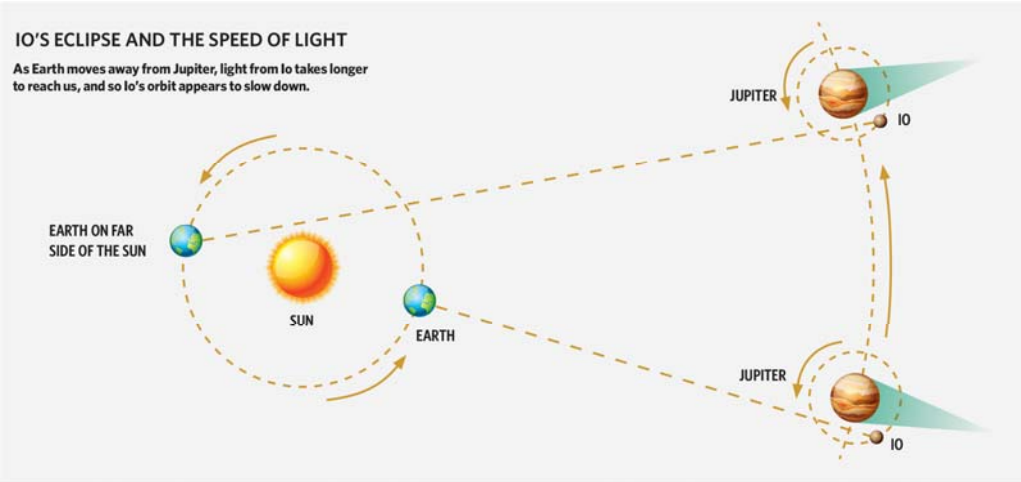
1814 von Fraunhofer
光譜儀與太陽暗線光譜

利用光譜儀發現太陽光譜
裡的324條暗線。後來經
Kirchhoff 與Bunsen解釋
為吸收光譜。





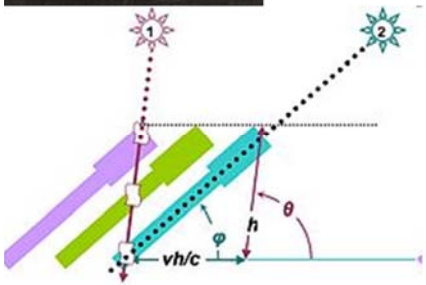
1676 Rømer
從木星衛星蝕的時間延遲推算光速

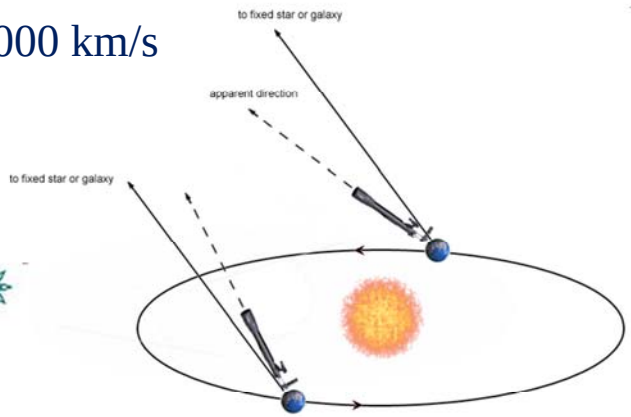


Huygens 估算得光速為110,000,000 toises/s, 1 toise ≈1.949 m 。

1729 Bradley
從星光的光行差測定光速

301,000 km/s

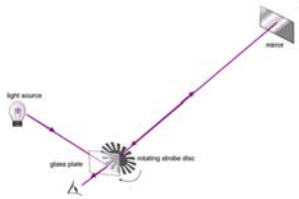


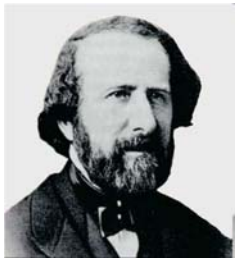


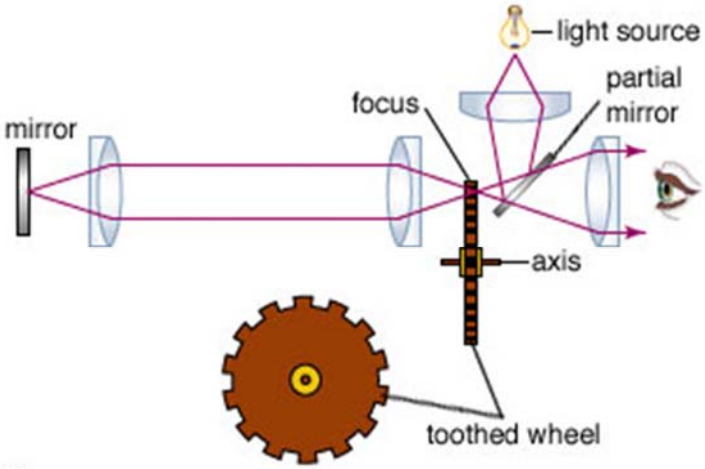
The apparent change in position of a fixed star or galaxy during an earth year is called aberration of starlight and its solution will be by means of derivation of relativistic aberration of starlight which Einstein accomplished in special relativity, 1905.

1849 Fizeau 地面上測定光速

- 空氣中光速：313,300 km/s







引言完畢 請討論

封面圖案說明

封面圖案由四十四位重要物理學家的圖片或相片依成就的大致先後順序組圖而成，他們是：

第一列：Galileo **Galilei**, Robert **Hooke**, Isaac **Newton**, Christiaan **Huygens**, Daniel **Bernoulli**, Joseph-Louis **Lagrange**, Charles-Augustin **de Coulomb**, Alessandro **Volta**, James Prescott **Joule**, Thomas **Young**, Augustin-Jean **Fresnel**, Nicolas Léonard Sadi **Carnot**, Michael **Faraday**, Rudolf Julius Emanuel **Clausius**.

第二列：James Clerk **Maxwell**, Ludwig Eduard **Boltzmann**, William Rowan **Hamilton**, William Thomson (Lord **Kelvin**), Hendrik Antoon **Lorentz**, John William Strutt (Lord **Rayleigh**), Max **Planck**, Josiah Willard **Gibbs**, Albert **Einstein**, Ernest **Rutherford**, Heike Kamerlingh **Onnes**, Niels **Bohr**, Louis **de Broglie**, Max **Born**, Werner **Heisenberg**.

第三列：Erwin **Schrödinger**, Wolfgang **Pauli**, Paul **Dirac**, Enrico **Fermi**, 湯川秀樹 (Hideki **Yukawa**), Lev **Landau**, 朝永振一郎 (Sin-Itiro**Tomonaga**), Julian **Schwinger**, Richard **Feynman**, John **Bardeen**, 楊振寧 (Chen Ning **Yang**), 李政道 (Tsung Dao **Lee**), 吳健雄 (Chien Shiung **Wu**), Murray **Gell-Mann**, Steven **Weinberg.**