

牛頓的運動及重力理論，可說是人類思想的一大勝利。從此人們憑藉兩條簡單的公式，就可以描述宇宙中任何物質的運動，而且準確性極高。不過，在十九世紀末，當很多科學家以為牛頓的理論已「征服」物理宇宙時，物理學正蘊釀著兩場翻天覆地的大革命。愛因斯坦的相對論徹底地改變了人們對時間、空間、重力及宏觀宇宙的理解[Fey65a,Tay63,Mis73,Wei72]，而量子力學則揭示一個奇異的微觀宇宙[Fey65c,Gui68,Wol89]。這兩場革命，令科學家驚覺人類直覺的不可靠，及宇宙之奇。本章簡介相對論的時空、質能及重力觀念。

2.1 狹義相對論 (Special Relativity)

狹義相對論的立論基礎是兩個假設。它們都不是憑空猜想出來，而是經過很多實驗歸納而得。第一個假設(我們稱為**相對性原理**)是幾百年前伽里略已提出的一個觀察：

A. 相對性原理(the principle of relativity)

對靜止或以均速運動¹的觀測者來說，物理定律的形式不變。

這原理很易理解。中國古書亦有「人在舟中，舟行而人不知」的說法，其實就是相對性原理的特例。日常生活中亦常碰到類似情形。例如我們站在地球上，而地球正以高速繞著太陽運行，但是我們都不會感覺到我們在運動。又例如當我們在一輛不停站列車內，經過另一列停在車站的火車，會弄不清是那一輛火車開動。這就衍生均速運動的**相對性概念**：既然火車上所有物理現象都不因車的均速運動而改變，我們無法以任何物理實驗測知火車正以均速運動，那麼原則上我們就不能說我們的火車在「動」，對面的火車「不動」。我們只能說我們的火車**相對於**車站及另一列火車正以均速運動。雖然我們生活上習慣以地球表面定為「不動」的參考，這卻只是眾多選擇之一，原則上並不比以一架在高空以均速飛行的飛機作為「靜止」的定義優勝，而從飛機下望，地球、車站、以及兩列火車都在動！所以均速運動只有**相對**的意義，沒有一個物體有**絕對**的均速運動(圖2-1)。這裏我們再舉一個例子說明相對和絕對的分別。我們說左方和右方是一個相對的概念，因為甲的左方未必等於乙的左方，它甚至可能是乙的右方！我們在指出左右方時，必需說明是**相對於**那一個觀測者。宇宙沒有絕對的左右方向。

不過我們要強調，相對性原理只適用於均速運動。若果物體的運動涉及加速或減速，它的運動就有絕對性了。想像剛才的例子，若火車駛進車站時逐漸減速，我們便可以感覺到。我們可以見到車內的乘客有些會站不穩，如果減速太快，有些乘客甚至可能跌倒。我們可以做一個很簡單的「物理實驗」：把一杯水放置在火車內，觀察水面的變化。我們會發現，火車均速前進時，水面平靜，就跟火車停在站內的情形一樣。但若火車加速或減速，杯內的水便會泛起漣漪，甚至瀉出杯外。因此，我們是不需要外望

¹ 亦即沒有加速或減速。

亦知道我們的火車在加／減速，我們不能說自己沒有加速，只是車站在減速，因為同樣的一杯水在車站裏水面保持平靜。

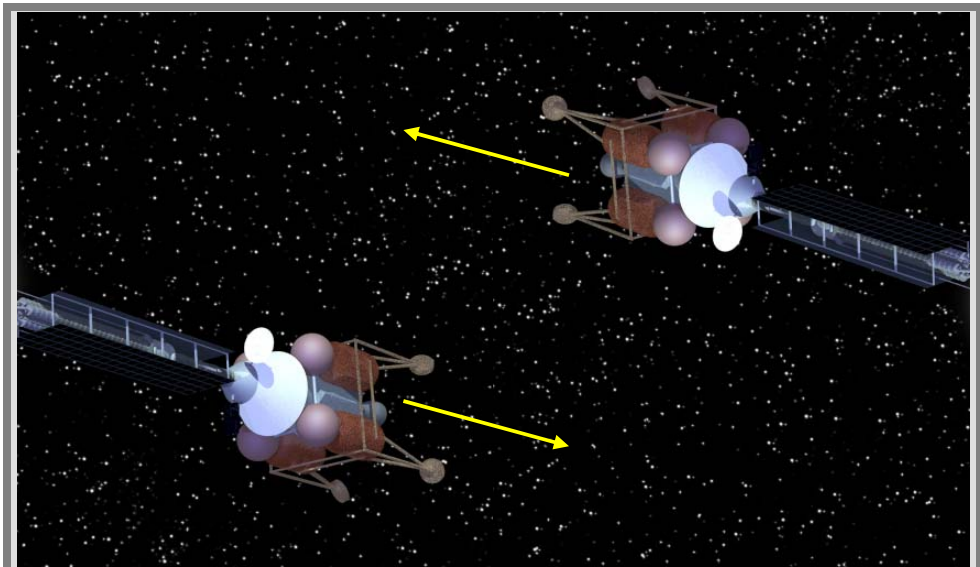


圖 2-1 均速運動是相對的。我們不能決定那艘太空船正在運動，只能說二者在相對均速運動。圖片由美國太空總署(NASA)提供。

相對論的第二個假設(圖2-2)，是：

B. 光速恆常不變 (the constancy of the speed of light)

對所有以均速運動²的觀測者來說，光在真空中的速度皆恆常不變。光速是絕對的。

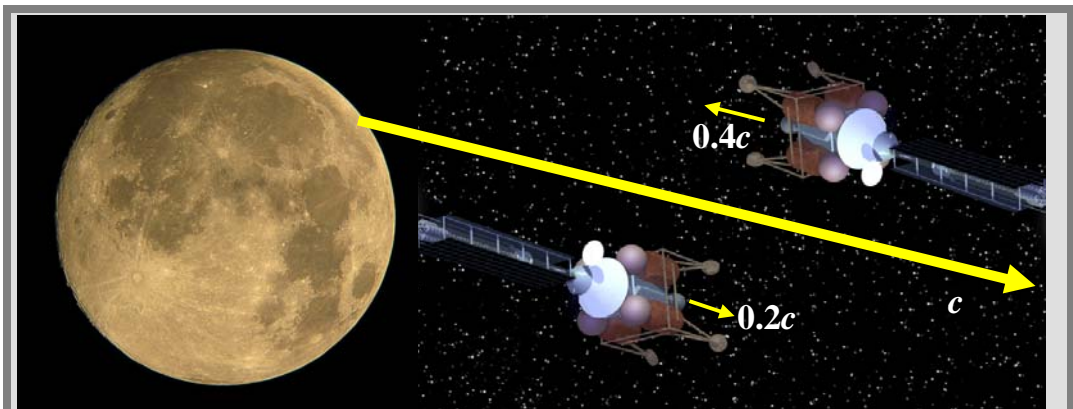


圖2-2 光速是絕對的。假設月球的基地向兩艘太空船發射一束光，無論在那一艘太空船上以均速運動的人所量得的光速皆一致(c)，與在月球面上的人所量得的結果相同。即使太空船以接近光速飛離或飛向月球(光源)，結果亦一樣。太空船圖片由美國太空總署(NASA)提供。

² 靜止亦是均速運動之特例。

這個假設與我們的直覺抵觸，所以我們會覺得它很奇怪。我們日常生活中感受到的情況是，一個物體的速度隨著觀測者的速度而改變。例如說，若一列火車(一號車)相對車站以時速八十公里前進，從另一列(二號車)朝著相同方向但時速七十公里的火車看，應見到前者時速就只有十公里了。這個把速度相減以求得相對速度的定律，已深深植根於我們的直覺。不過，假若站長從車站發出一束光線，射向一號車，車上的乘客觀察到的光速是幾多？我們直覺以為，若車站上的人量得光速為每秒三十萬公里，那一號車內的觀測者見到該束光以稍慢於每秒三十萬公里的速度追來³。這卻與光速不變定理不符；我們的直覺錯了！實際上，無論一號車、二號車、或車站上的觀測者，都量出完全一樣的光速，都得出每秒三十萬公里。光速相對不同速度的觀測者完全不變。即使火車以接近光速的速度前行，裏面的乘客仍然看到那束光以每秒三十萬公里經過。這個結果對我們來說頗為奇怪，但在眾多的實驗證實(例如邁克耳孫-莫雷實驗 Michelson-Morley Experiment [Fey65a])下，我們不得不接受⁴。

2.2 狹義相對論的一些結果

基於相對性原理及光速不變這兩個假設，我們可以用邏輯推理得出一些重要的結果。在下一節討論這些推理之前，首先讓我們簡述部份重要成果。愛因斯坦指出，**時間是相對的**。換句話說，如同左右方向一樣，時間只有相對的意義；以不同速度運動的觀測者時間亦不一樣。宇宙中沒有一個絕對的時鐘。具體而言，狹義相對論導出**同時之相對性(Relativity of simultaneity)**及**時間延滯(Time dilation)**現象，都清楚地顯示著時間的相對性。**空間亦是相對的**。空間隨著觀測者的運動速度而改變，導致**羅倫茲收縮(Lorentz contraction)**現象。宇宙中沒有絕對的空間。空間和時間可以互相交換，因此必需把兩者結合起來看，即**時空(space-time)**，才有其絕對意義。

若果時間是絕對的，那麼兩件事是否同時發生，對任何觀測者都應是一致的了。可是，狹義相對論指出，對一個觀測者同時發生的事件，對於另一些以不同速度運動的觀測者卻不是同時發生了。這就是同時之相對性。時間延滯是指運動中的鐘錶運行較慢。換句話說，時間的流逝速度亦跟隨觀測者的運動而改變，動鐘較慢。時間可以被拉長，空間也可以被縮短。任何運動中的物體，空間隨其速度而縮短；動尺較短，此即羅倫茲收縮現象。

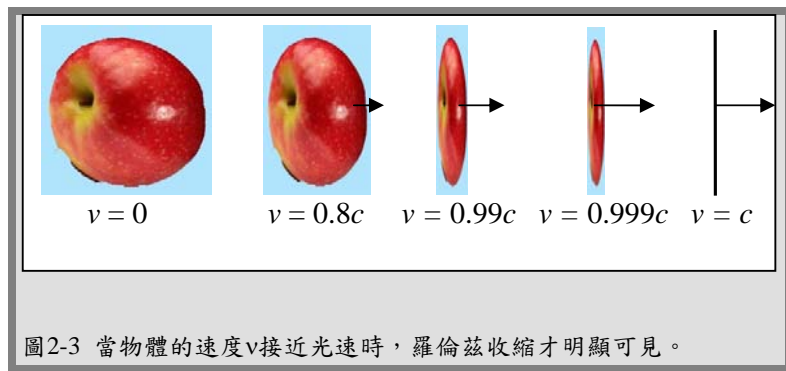
正如時間一樣，質量亦是相對的。運動中的物體質量亦相應增加。根據狹義相對論，運動中的物體質量增大，時間延滯，及空間縮短的程度，都會隨著速度而增加，至接近光速時均趨向無限大！換句話說，若一艘太空船以光速飛過，我們將見到船內的時間停頓，船上所有物體包括太空船本身長度縮至零，但它的質量卻無限大！

那為甚麼相對論導出的這些結果與我們的直覺有那麼大的差異？主要原因是無論時間延滯、空間縮短、或質量增大，在低速時都不顯著。這裏「低速」是比較光速而言。我們日常生活所習慣的速度，都是極低速。例如一列每小時行走三百公里(速度大約只是光速的一千萬份之三)的高鐵火車所產生的時間延滯或長度收縮，大約為原本時間或長度的一百萬億份之四(4×10^{-14})，我們根本不可能察覺到如此微小的變化。只有當物體

³ 若速度相減原理正確，那束光會以每秒299,999.977778公里，即光速減去時速八十公里的速度追來。

⁴ 光速的絕對性亦可從麥斯維(Maxwell)的電磁理論理解[Fey65b]。

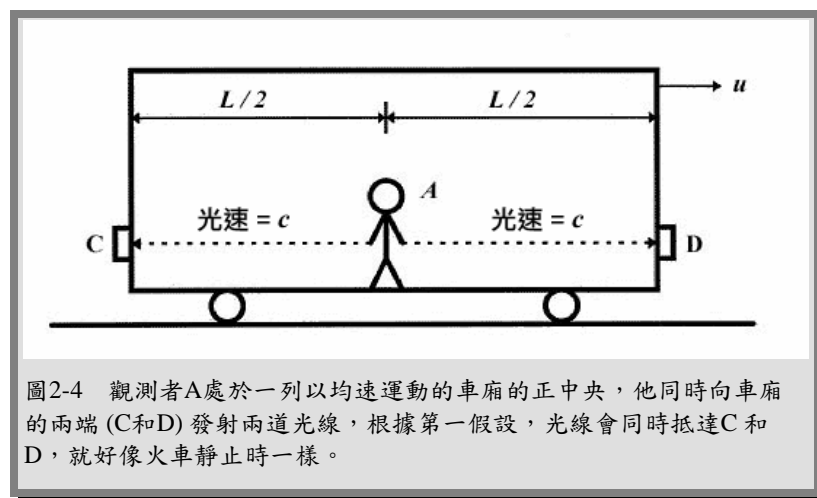
運動的速度接近光速時(例如在加速器中或宇宙射線中的粒子)，我們才可察覺到這些效應(圖2-3)。至今仍未有任何實驗結果與狹義相對論的預測相違背[Fey65a,Tay63]。



如果我們以日常生活的直覺作判斷，也許會對時空的相對性感到詫異。但事實上，我們往往被自己的直覺誤導！而且在眾多實驗和觀測的驗證下，我們也不得不接受這些「奇怪」的結果。我們身處的宇宙往往比人們想像中更神奇！不過，我們是可以用邏輯及科學方法「戰勝」直覺的迷誤。以下我們就以一些「思想實驗」(thought experiment)看看狹義相對論的兩個假設如何導引出時空的相對性。

2.3 同時之相對性 (Relativity of simultaneity)

首先我們想像以下一個簡單的「實驗」。讓觀測者A站於一列(相對地面)以均速 u 運動的車廂的正中央，並且他同時向車廂的兩端 (C和D) 發射光線(圖2-4)。根據相對論原理，A君不能以任何實驗測知火車的運動，他只會覺得處身於一個靜止的車廂。所以他看到光線同時抵達C和D⁵。



⁵ 其實讀者大可在自己房中模擬這實驗，因為從太空看，我們在地球表面差不多以均速前進。

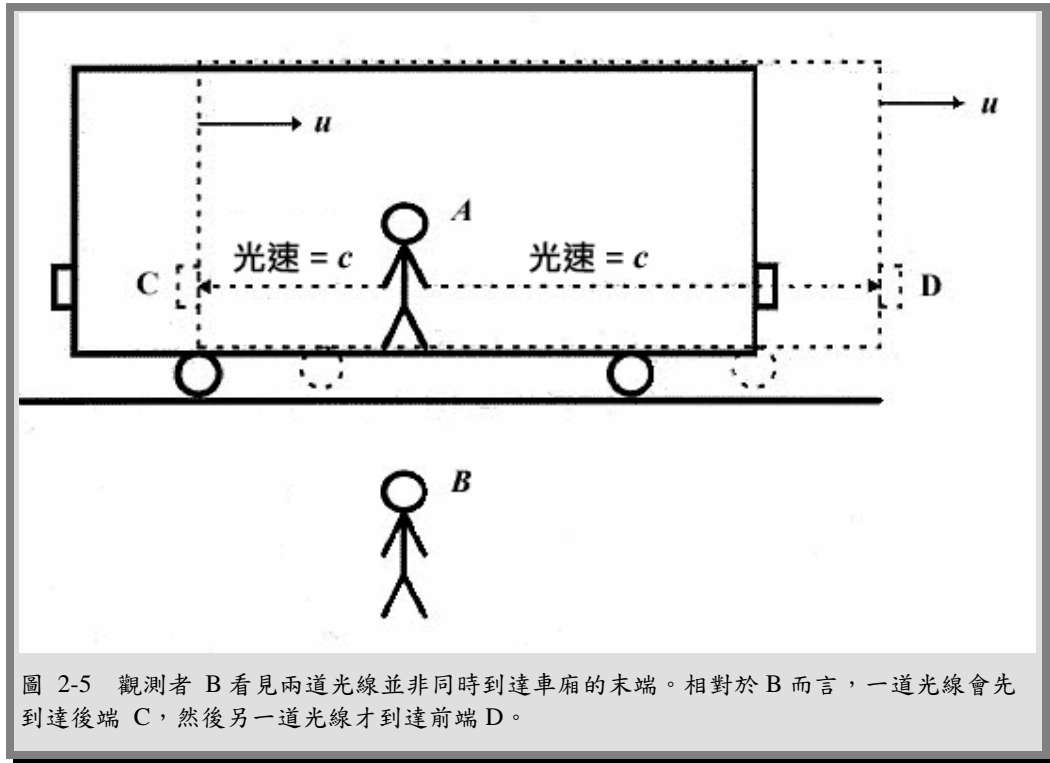


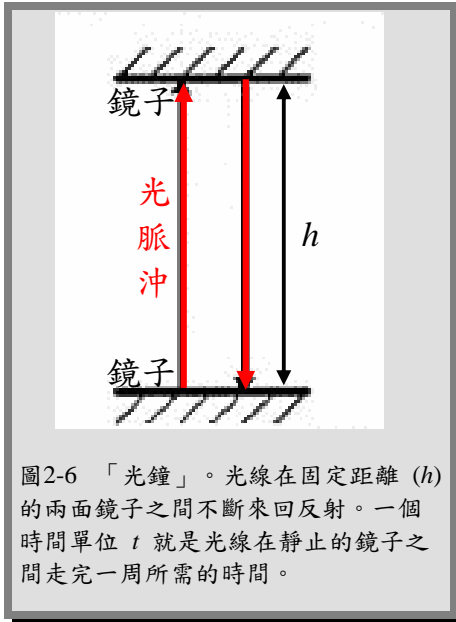
圖 2-5 觀測者 B 看見兩道光線並非同時到達車廂的末端。相對於 B 而言，一道光線會先到達後端 C，然後另一道光線才到達前端 D。

好了，讓我們想像另一個站在路邊的觀測者B看到的情形。他看到火車以速度 u 駛過，而車中心的A君向車頭和尾同時發出光線。根據光速不變原理，他看到兩束光以相同的速度向C和D進發(圖2-5)。不過，B君看到當光線飛行時，車廂的**前端移離**光線，而車廂的**後端迎向**光線。既然速度一樣，但飛向車頭的光線要走遠一點才「追上」D，顯然D接收訊號要比C遲，對於B君，或任何相對於火車作運動的觀測者而言，光線**並不同時**到達C和D！

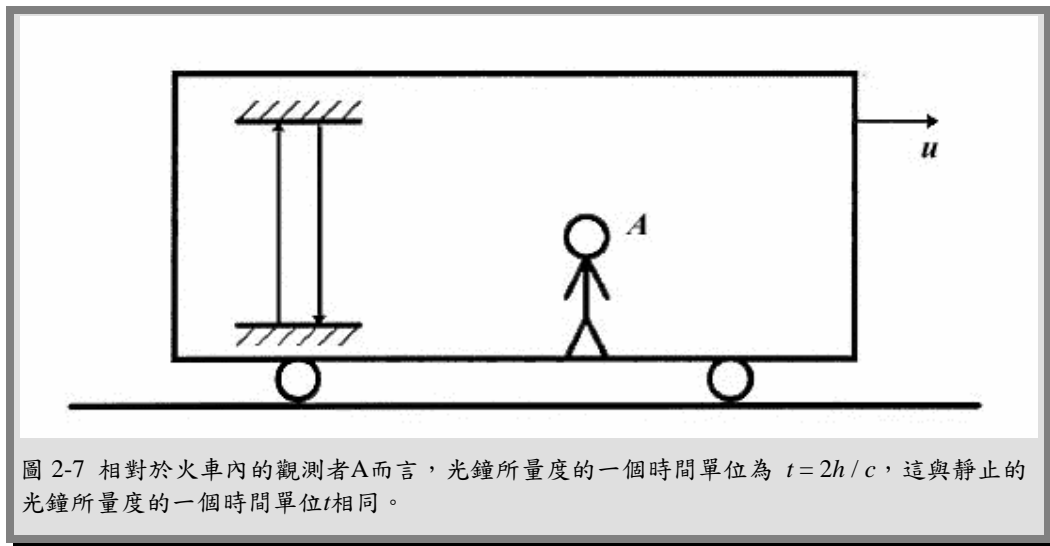
A君看到同時發生的兩件事，B君覺得不同時。那麼誰對誰錯？明顯地，A或B都沒有說謊！兩者都沒有錯。錯的是問題本身！問題假設了A或B其中一個人錯，亦即假設了「同時」是一個絕對的概念。若我們接受兩件事是否同時發生對不同速度的觀察者有不同答案，那就沒有問題了。換句話說，**同時性的概念是相對的**。當然，這意味著，時間亦必然是相對的，因為若宇宙中有一個絕對的鐘，我們就可以用這個鐘做一個絕對的標準，以判斷兩件事是否同時發生。

回想這個思辯過程，大家應發覺「同時是相對的」這「奇怪」結果源於光速不變。若果B看到火車內的兩束光以不同速度飛向C及D，那麼以上的結論就要改變了。例如說，若光的速度亦尊從簡單相加減定律，即向D的光束速度為 $c-u$ ，而向C的為 $c+u$ ，那麼B君將得到與A君相同的結論：光線同時到達C和D。不過，我們以日常生活經驗歸納出的速度相加減定律是錯的！在低速時，它還可算是一個好的近似，但若物體速度接近光速，簡單相加減就錯得厲害。實驗證明，向C和D的兩束光的速度，無論是火車內或外觀察，都是完全一樣。

2.4 時間延滯 (Time Dilation)



讓我們做另一個思想實驗再突顯時間的相對性。為了準確量度時間，我們可以製造一個簡單的時鐘，姑且稱為「光鐘」(圖2-6)。原理是靠光線在固定距離 (h) 的兩面鏡子之間不斷來回反射，當光線每次走到下面的鏡子時，這個鐘就會響一下，表示光線走完一周 ($2h$)。因此我們定義了一個時間單位 ($t = 2h/c$)，而且我們可以調校兩面鏡子的距離以使這個單位時間剛好等於一秒⁶。注意，我們特意用光來造這個鐘是因為光速是絕對的。只要兩面鏡子的距離不變，光鐘就極之準確。調校好後我們把兩個完全一樣的光鐘分派給A和B。A和他的光鐘在一列以均速 u 運動的火車內 (圖2-7)。根據相對性原理，A在火車內看不出光鐘有任何異常，只是準確地每秒報時。當然在路邊的B君亦看見自己的光鐘每秒報時。注意A和B都可以把其他的鐘錶放在光鐘旁做比較。他們都會看到光鐘和其他「正常」的鐘同步，並無特別，不會因火車的均速運動而變得不同步⁷。因此實驗的結果並不依賴於光鐘的「特殊」結構。使用光鐘或其他鐘錶都會得出同樣結果。



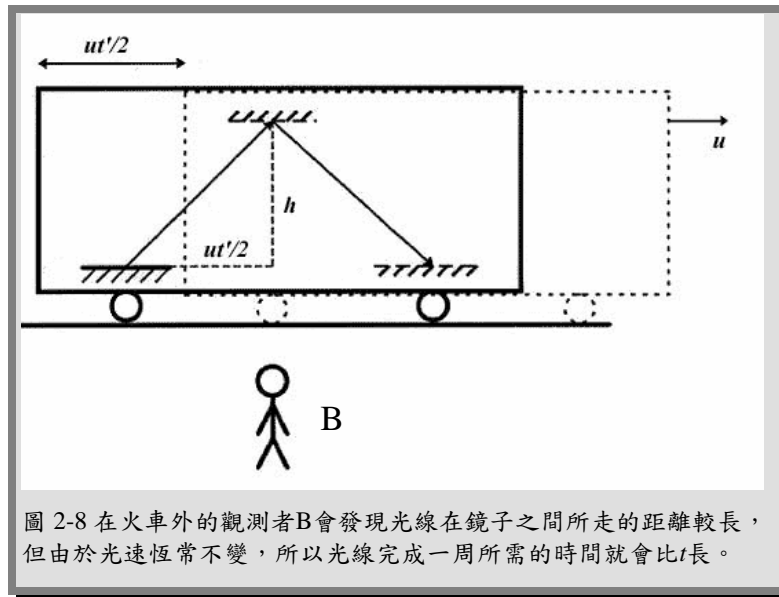
問題是，B看着火車上A的光鐘⁸，和B自己的鐘如何比較？B看到火車上的光鐘，運行情況就如圖2-8所示：當光線在鏡子之間不斷往返時，鏡子本身也在運動。因此光線需要走較長的距離方能完成一周。既然光速相對A和B完全相同，那麼B的必然結論，就

⁶ 當然這並不實際，因為要把兩面鏡分隔十五萬公里，時間值才能調至一秒。對於這個思想實驗，任何長度的時間單位沒有原則上的分別。

⁷ 這是相對性原理的後果。

⁸ 想像光鐘內注入煙霧，使我們看得見光脈沖的軌跡吧。

是火車上的光鐘運行得比路邊的光鐘要慢！B看見火車上的一秒(光往返車上的兩面鏡子)所需時間較自己的一秒為慢。這就是**動鐘延滯**的現象。



注意在以上的推論，我們假設了光鐘的高度 h ，即兩鏡垂直於運動方向的距離，無論在火車內外看都一樣，否則我們不一定得到時間延滯的結果⁹。這其實是相對性原理的必然結果，我們可以用另一個思想實驗看出來。讓我們做一個高度和火車靜止高度一樣的標記，豎立在路旁。假設我們在車外見到火車行駛時車廂縮矮了，那麼火車內的A君亦應見到車外的標記縮矮了¹⁰。這才符合運動的相對性。我們可以在標記頂端掛一枝鎗，當火車駛過時發射。問題是，我們會否射中火車？在火車外看，火車縮矮了，所以子彈在火車頂上飛過，射不中。但在火車內看，標記矮了，子彈就應射中車廂。兩個情況不可能都發生，因兩者有不同物理後果。假設火車行駛時增高了亦得出類似的矛盾。所以唯一合理的可能性是高度不變，即**垂直於運動方向的長度不變**。

我們可以用簡單的算術推算出時間延滯的程度¹¹。假設對觀測者B來說，光線由A的光鐘下面的鏡子走到上面的鏡子所需的時間為 $t'/2$ 。根據**畢氏定理**，所走的距離為

$$\sqrt{\left(\frac{ut'}{2}\right)^2 + h^2} = \frac{ct'}{2} \quad \circ$$

$$\text{因此， } t' = \frac{2h/c}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \geq t \quad \circ$$

⁹ 如 h 縮短，光走的路線未必長了。

¹⁰ 因為他看見的情況是自己靜止標記以速度 u 經過。

¹¹ 讀者若不喜歡看數學推導，可略去以下討論。

動鐘運行得較慢(時間延滯)¹²！當火車速度 u 接近光速時，時間延滯趨向於無限大，我們看到火車內的時間差不多停滯不前！既然時間的間隔相對不同速度的觀測者有不同的數值，**時間必然是相對的**。

2.5 羅倫茲收縮 (Lorentz Contraction)

量度物體的長度，可用兩個步驟：首先紀錄下物體兩端的位置，然後計算兩位置的距離。不過可要小心一點，我們必需肯定紀錄兩端位置是**同時**進行的。例如說，我們若要知道一列車廂的長度，可以在車廂正中央放兩個光源，同時射向兩端(圖2-4)。當光線到達車廂兩端時，預置的接收器便會記錄下時間。我們既可保證光線同時到達，又得知光線的總飛行時間，然後只需乘上光速，便可準確量出車廂的長度。我們可以看到，量度長度，其實和量度兩事件發生的時間沒有分別。讀者或已想到，時間和同時性既是相對的，而長度和時間量度相關，那物體的長度亦必然是相對的了。

若我們要用同樣方法去量一件運動中的物體，那就出現問題了。正如2.3節的討論一樣，我們可以在車外觀察車內的人(A)量度車長(圖2-5)。我們知道A君在車內見到**同時**發生的兩件事－光線到達C和D，相對B君卻**不同時**。所以，雖然A君自覺準確地量出車廂的長度－且稱為靜止長度吧，B卻「見到」A量錯了。B看見A於兩個不同時間紀錄車廂兩端位置，而火車在這兩個時間中已移動了一段短距離！所以B認為A量得沿運動方向的長度比車廂的「真正」長度長了。B相信，車廂的「真正」長度應短於A量得的靜止長度。A與B，誰對誰錯？

答案當然是兩者皆對，但任何物體**沿著其運動方向**的長度皆跟隨其速度而改變，是相對的。我們得出兩個重要結論：第一，運動中的物體比靜止時短(稱為**羅倫茲收縮**現象)。第二，既然上述的思辯並不依賴物體的材料、構造、或性質，都得出相同的羅倫茲收縮，那麼必然是**空間本身在收縮**，是空間的相對性導至長度的相對性。所以空間也是相對的。

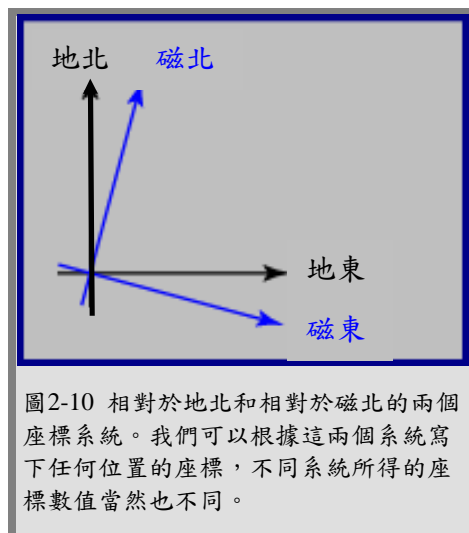
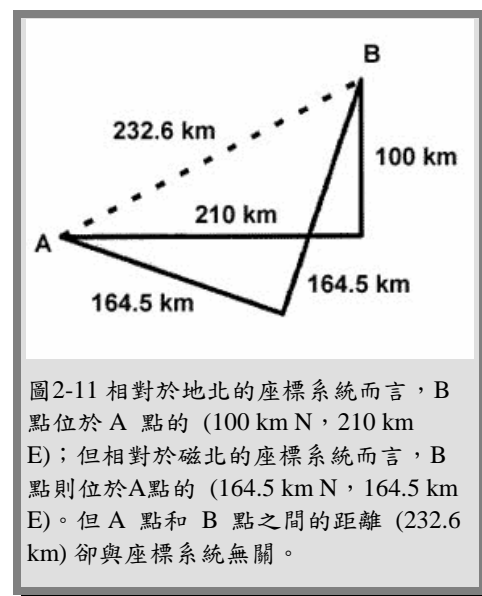
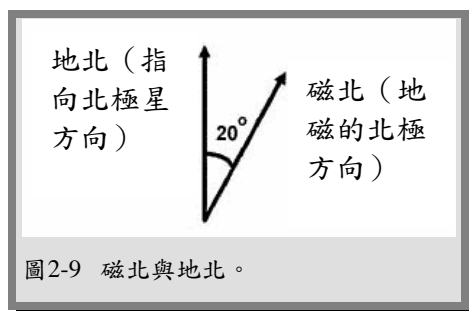
2.6 時空(Space-time)

上述的思想實驗證明空間與時間皆跟隨觀測者的運動改變，故兩者都是相對的概念。我們亦見到運動中的物體時間拖長了，空間卻縮短。這好像表示空間和時間可以互相「交換」。時間和空間要結合起來才有絕對意義。打個譬喻，一個硬幣一面是字另一面是圖案，我們從不同角度看到字和圖案的各種組合，見到多些字的都份就必然少些圖案。當然我們知道硬幣的兩面是分不開的一體。時間和空間也是一體的兩面；這就是**時空(space-time)**的概念 [Fey65a,Tay63]。

我們再用另一個類比說明相對論的時空概念。我們知道地球的磁北極與地球自轉軸所指的北極並不一樣。所以磁針所指的北方(磁北)與北極星所標示的北方(地北)有些偏差

¹² 觀測者 A 反而會發現在火車外的鐘錶(例如B的錶)比火車內的行得較慢，因為A會認為自己是靜止的，而相對地B就以相反方向運動著。事實上，所謂的絕對時間並不存在。

(圖2-9)。假設這偏差為二十度¹³。大家都知道，東南西北這些方向概念，只是人為定義的，有不同的座標系統並不奇怪。只要大家說清楚用那一個「北方」的定義，就不會引起混淆(圖2-10)。而且，我們很容易從一個座標系統轉化至另一個。假設我們要在地北及磁北兩個系統中表達兩個城市A和B的相對位置(圖2-11)。在地北座標中，B在A的北方一百公里，東方二百一十公里。若果我們用磁北的座標，我們就要說B在A的北方和東方都是164.5公里。我們都不會因為這些數字在不同座標相異而奇怪，因為它們都是相對的。甚至乎，任何人皆有權既不取地北，亦不用磁北，自定北方。不過，A與B的距離卻是絕對的，無論你用地北、磁北、或任何座標，都得出232.6公里。從地北系統看，磁北的方向可以說為「地北與地東的混合」；反過來說，地北則可說為「磁北與磁東的混合」。所以北與東可「互換」，本質上是一體的。亦只有結合來看才有絕對意義。



把以上例子的北方比擬為時間，東方比擬為空間，我們便得出狹義相對論的時空觀¹⁴。對磁北座標系統來說，B點的「北方」數值較大(類比於時間延滯)，但它的「東方」數值較小(類比於長度收縮)。這可以類比於不同觀測者在觀測同一事件時，他們所得的時間和位置數值雖然不同，但兩事件之間的「時空距離」卻

是絕對的，與觀測者的運動無關。

時間和空間既為一體，不可分割，我們就要接受**宇宙是四維(four-dimensional**，三維空間加上一維時間)的。

¹³ 實際的偏差在地面不同地方有不同數值，但真正數值對這類比並不重要。

¹⁴ 注意 相對論的時空座標轉換的數學形式與這個例子不完全相同。

2.7 質量與能量(Mass and Energy)

除了時間和空間之外，很多其它物理量都是相對的。實驗證明，物體速度逾高就逾難加速，要把一個有質量的物體加速至光速，就需要用上無限大的能量。我們可以把這現象歸納為物體質量隨著其速度加快而增加。質量亦像時間一樣，是相對的。正如動鐘延滯一樣，運動物體質量增大。

愛因斯坦想通了質量的相對性後，就做了一個大膽的預言。既然把物體加速需要能量，而物體的質量亦隨之增大，那麼我們可以把物體「吸收了」能量變成質量。那就是說**能量與質量是同一類東西，可以互相轉化！**於是，愛因斯坦寫下著名的質能轉換程式 $E = mc^2$ [Fey65a, Tay63]。能量與質量本質上並無分別，只是我們以前的誤解把兩者區別對待，用上不同單位而已。只要把任何物體的質量乘上光速值平方¹⁵，便得到對等的能量(圖1-12)。這裏我們可以瞥見天才的深刻洞悉力。無數實驗已證實質能互換的真確，人們亦已廣泛應用這知識，包括核子發電以至核彈。我們每天見到的陽光及星光，都是這一條表面極簡單的公式的明證。

2.8 廣義相對論 (General Relativity)

「征服」了時空、質能之後，愛因斯坦進而思考重力的問題。表面看他的狹義相對論只適用於均速的狀況，而重力則必然涉及加速度，所以要把狹義相對論伸展至與重力理論結合，是一個極困難的問題。

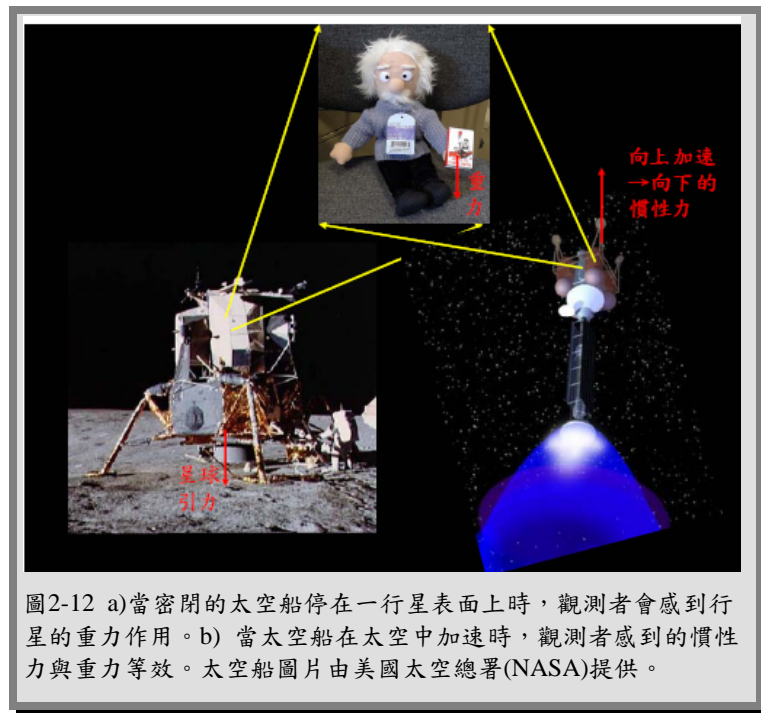
發表了狹義相對論之後，愛因斯坦已經在學術界有名氣，但他仍有一段時間繼續在專利局當文員，享受工作的清閒。他每天就在辦公室思考重力，終於有一天他得到一個他自己認為是畢生最快樂的念頭。這念頭倒非常簡單，很多讀者或都想過了，可以一句話概括：**自由下墜的物體沒有重量**。一般人自由下墜的經驗或許不多，不過大多會看過紀錄片中太空人在太空船內的失重狀況。船艙內的物體都輕漂漂浮在空中，非常有趣。從牛頓的理論我們得知，圍繞地球軌道飛行的太空船是在自由下墜的狀況，裏面的太空人就體驗出「自由下墜的物體沒有重量」這道理。現代人時興的一個玩意是「笨豬跳」-繫上繩索的人從高空下跳。在人們跳下的最初一段短時間，繩索完全沒有張力，自由下墜的人沒有重量去拉扯繩索。過了一段時間笨豬跳者才被拉停，吊在空中，這時他再不在自由下墜的狀態，他的重量亦回復正常，繩索的拉力抗衡重力。

這個小學生也懂的簡單概念，卻令愛因斯坦這個偉大天才欣喜若狂，因為他悟出一個極之重要的道理：**原來根本沒有重力！**重力只是我們處身一個「錯誤」座標系統內的感觉。只要我們轉換至自由下墜觀測者的角度，那就根本沒有重力¹⁶。所以，原則上重力問題只是選擇「正確」座標系統的問題。換句話說，我們只要在每一個時空點上用自由下墜的座標，就可以消除重力。

¹⁵ 這裏光速平方就是一般用的能量和質量不同單位的兌換。

¹⁶ 物理學上，這類因座標系統而出現的力稱為**假力(fictitious force)**。

我們知道，在地球上空自由下墜的物體速度會變化，有加速度。因此，在重力場中自由下墜的觀測者座標系統是有加速度的。這引申出**等效原理 (Principle of Equivalence)**：觀測者不能在局部的範圍內分辨出由**加速度所產生的慣性力**和由**大質量物體所產生的均勻引力**。用一個簡單例子來說就更清楚：想像太空人在太空船內拿起一塊磚頭，有兩個可能性令他同樣感受到磚頭的重量。太空船可能停在一顆行星上，行星的重力場向下拉扯著磚頭，此即一般所說的重力，或牛頓的萬有引力。另一個可能性是太空船在太空中正向上(相對於太空人)加速。雖然附近沒有任何星球或重力場，太空人仍會感覺到磚頭有下墜的傾向，這就是慣性力(圖2-12)。等效原理是說，密封於船艙的太空人不可能分辨出這兩個可能性。對於任何物理現象的影響而言，**重力等效於加速度引起的慣性力**[Mis73,Wei72]。



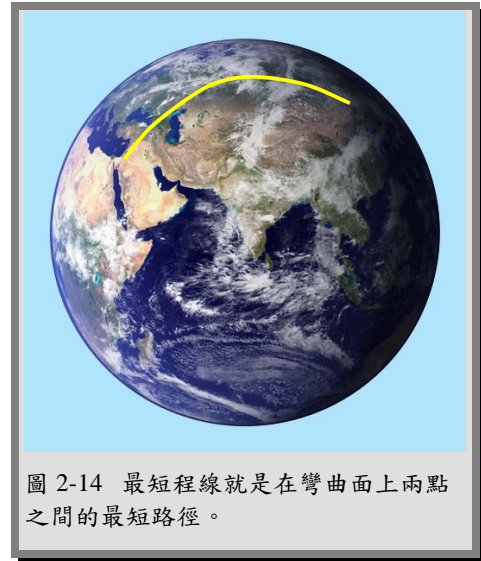
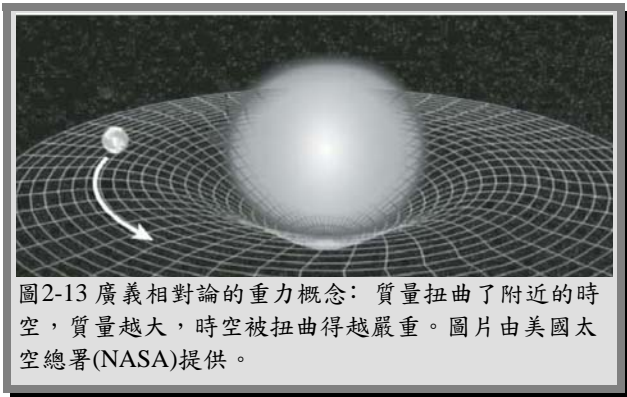
正如相對性原理或光速原理一樣，等效原理是相對論的基本假設。它們沒有邏輯上的必然性，而只是基於對自然觀察而得出的猜想。我們只可以用實驗方法去驗證它們的真確性。科學發展的歷史告訴我們，絕大部份的物理定律或理論，都不是絕對地廣泛適用的。若果將來科學家實驗上在某些現在未能探索的範疇(如極大質量或極小空間尺度)否證等效原理，我們不但不會驚奇，甚至會以欣喜去迎接這突破。這就是科學進步的軌跡。

我們熟知物體均速運動的軌跡為直線，而加速度則可以曲線表達。把一個網球拋出，它向下的加速令它的下墜軌跡為曲線，稱為拋物線。所以，加速度是可以用空間的變曲來代表。當然我們知道時空為一體，所以準確的說，我們可用**時空的彎曲**來代表加速度。愛因斯坦對等效原理的闡釋，亦是**廣義相對論**的根本精神，就是**質量導致時空彎曲，而彎曲的時空則導致其他質量加速**。

讓我們用一個圖像化的類比來說明愛因斯坦的重力理論。想像一個二維時空，每一時空點上我們都可以建立一個座標系統：橫軸指向「空間」的方向，縱軸表示「時間」

的進程(圖2-13)。若果這個二維宇宙沒有任何質量，時空沒有被扭曲，我們可以把所有點的時空座標以直線連結起來，形成一張平整的網。這樣的時空，稱為**平坦時空(flat space-time)**，亦即狹義相對論適用的宇宙。現在讓我們替這個宇宙加入物質。想像把一個有質量的球放到這個網上面。球的質量，令到網不再平直，而是在球的附近彎曲，造成一個洞。這個扭曲了的網，代表被質量影響的時空；質量越大，時空被扭曲得越嚴重。若另有一個小球滾至大球附近，它就會跌進洞內，圍著大球而轉動。我們遠離球外看到的是小球繞著大球公轉，就像兩者之間有引力，互相吸著。

物體總是揀選時空中最短的路徑 (**最短程線, geodesic**) 運動，不過最短程線未必是「直線」。例如我們在地球表面行走，當選擇最短程線時，自以為走直線路徑，但從太空看就見到我們的路線跟隨著地球表面而彎曲了(圖2-14)。小球其實以「直線」軌跡運行，不過大球附近的時空被扭曲了，以至從遠方看到彎曲的軌道。所以連曲直也是相對的。



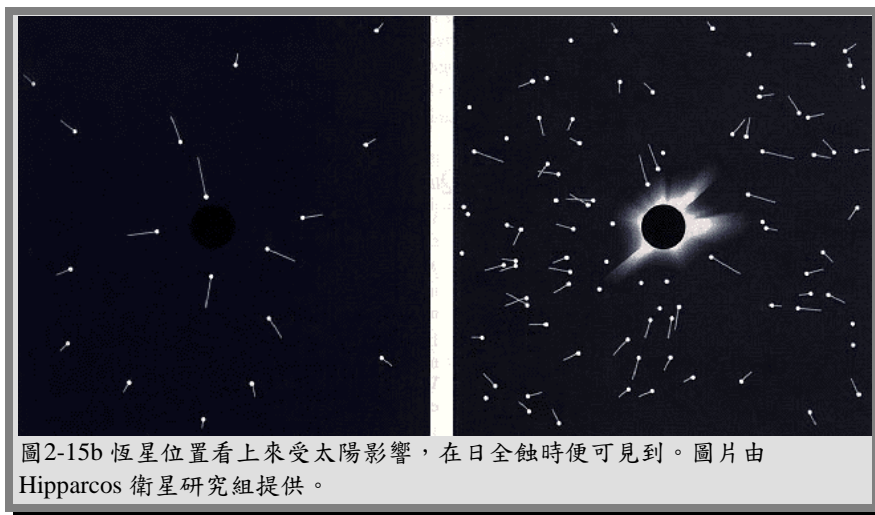
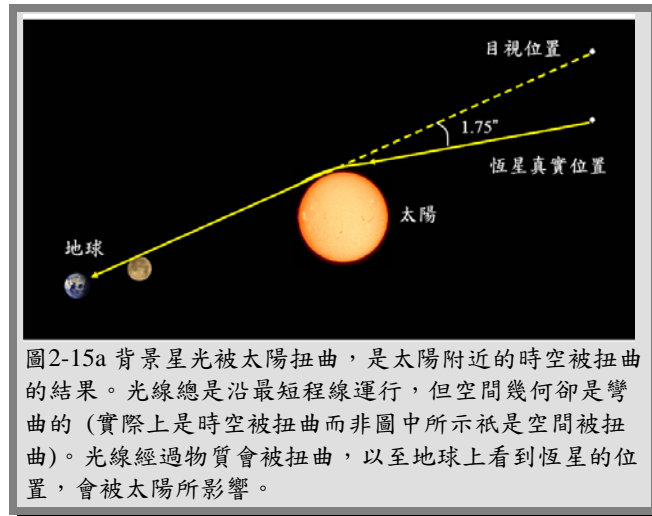
廣義相對論是一嶄新的重力理論。當考慮**微弱**的重力場時，它可被簡化為牛頓理論。因此牛頓的重力理論可看成是廣義相對論的近似。日常生活的重力現象都可以用牛頓或廣義相對論描述。不過，當重力場很強的時候，二者就有差異。

有強大的重力場時，廣義相對論預言一些與牛頓重力相異的結果。這些當然都由時空彎曲引起。例如光線會被重力場扭曲¹⁷，就沒有牛頓理論的對應。當日食發生期間，研究員發現背景恆星光被太陽輕微扭曲了。恆星位置的微小變化(約1.8秒)亦與理論的預期一致(圖2-15a,b)[Mis73,Tho94,Wei72]。質量可以把光折射，愛因斯坦因而預言了**重力透鏡(gravitational lens)**的存在¹⁸(圖2-16a,b)。重力場還會把時間拉慢，空間縮短。這些都已有很多準確的實驗或觀測證明了[Wil88]。廣義相對論亦解釋了行星公轉軌道的過多**歲差(cession)**。水星的歲差比牛頓理論預期的數值大，相差為每世紀四十三秒(圖2-17)，剛好和廣義相對論的預測吻合。一個尚待驗證的廣義相對論結果，是時空擾動可以波動形式傳播。這些**重力波(gravitational waves)**就像水面被擾動時傳出的水波，

¹⁷ 當然正確說法應為光線在被重力扭曲了的時空傳遞。

¹⁸ <http://opposite.stsci.edu/pubinfo/PR/1999/18/index.html>

但波動的是時空本身[Ken00,Fra00b]。美歐日等國家都在建造一些大型重力波天線，希望能接收到宇宙遠方傳來微弱的重力波¹⁹[San00]。廣義相對論最著名的預測，應算是黑洞以及宇宙的膨脹，亦已得到驗證。我們將在第三及四章詳述之。



¹⁹ <http://www.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/NumRel/LIGO.html>

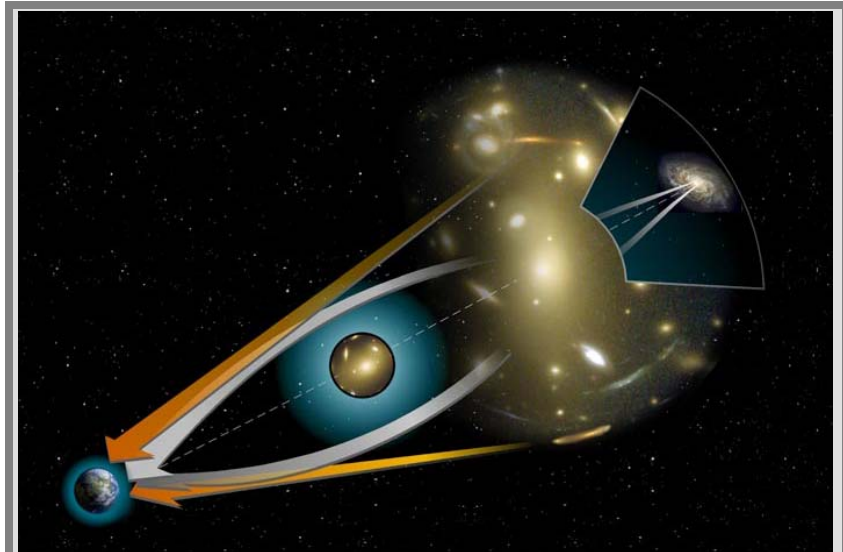


圖2-16a 重力透鏡示意圖。遠方星光被星系團折射而「聚焦」於地球。圖片由美國太空總署(NASA)提供。



圖2-16b 重力透鏡Abell 2218。照片由美國太空總署(NASA)以哈勃太空望遠鏡拍得。

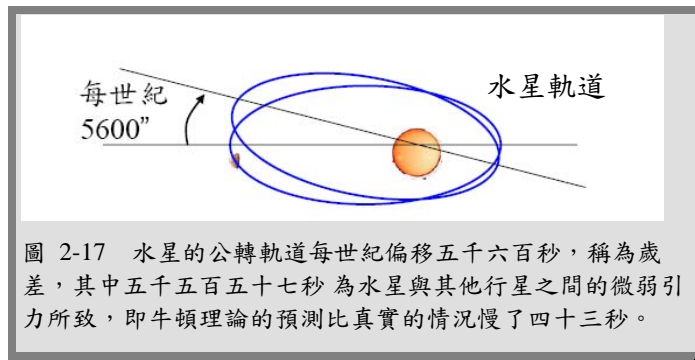


圖 2-17 水星的公轉軌道每世紀偏移五千六百秒，稱為歲差，其中五千五百五十七秒為水星與其他行星之間的微弱引力所致，即牛頓理論的預測比真實的情況慢了四十三秒。

參考書目

- [Fey65a] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I (Addison-Wesley, Reading, 1965).
- [Fey65b] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. II (Addison-Wesley, Reading, 1965).
- [Fey65c] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. III (Addison-Wesley, Reading, 1965).
- [Fra00b] Adam Frank, *Teaching Einstein to dance: the dynamic world of general relativity*, Sky & Telescope Vol. **100**, p. 50, October 2000.
- [Gui68] V. Guillemin, *The story of quantum mechanics* (Scribner, New York, 1968).
- [Ken00] D. Kennefick, *Gravitational waves: a prehistory*, Sky & Telescope Vol. **100**, p. 58, October 2000.
- [Mis73] C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1973).
- [San00] G. H. Sanders and D. Beckett, *LIGO: an antenna tuned to the songs of gravity*, Sky & Telescope Vol. **100**, p. 40, October 2000.
- [Tay63] E. F. Taylor and J. A. Wheeler, *Spacetime Physics* (Freeman, San Francisco, 1963).
- [Tho94] Kip S. Thorne, *Black holes and time warps – Einstein’s outrageous legacy* (Norton, New York, 1994).
- [Wei72] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology* (Wiley, New York, 1972).
- [Wil88] C. M. Will, *Was Einstein right?: putting general relativity to the test* (Oxford, Oxford, 1988).
- [Wol89] F. A. Wolf, *Taking the quantum leap* (Harper and Row, New York, 1989).