

「星際效應」的大眾天文學

Popular Astrophysics from Interstellar

林皆安 法國原子能研究總署

Lin, Chieh-An The French Atomic Energy and Alternative Energies Commission(CEA Saclay)

人造重力、黑洞視界、時空扭曲、五度空間，這對多數人而言，原本只是虛實難測、不知所以的外星語言，但「星際效應」貴為2014年最賣座的電影之一，讓這些幾分科幻卻又貌似有幾分科學的專有名詞，三番兩次地躍上餐桌，遊蕩於耳語閒聊間。在導演諾蘭(Christopher Nolan)的巧妙詮釋下，星際效應不僅滿足了許多科幻迷的想像，同時也激起了普羅大眾對外太空的好奇心。

以科學的角度來看，本片與以往科幻電影最大的不同在於考據程度，整篇故事最早靈感來自加州理工學院(California Institute of Technology)理論物理教授索恩(Kip Thorne)，諾蘭也順理成章地邀請他參與劇本撰寫，使劇情盡量符合科學法則，索恩教授甚至出版名為「星際效應裡的科學(The Science of Interstellar)」之科普讀物，探討當今人類對天文以及重力的認識。這番藝術家與科學家攜手合作的佳話，無疑對往後的電影立下典範。

雖然並非人人都對天文物理或相對論感興趣，但對電影情節產生好奇卻是人之常情。人造重力可行

嗎？黑洞又是怎麼一回事？孰為真？孰為想像？本文嘗試以電影場景為楔子，從普羅大眾之角度解讀物理以及宇宙知識，目的不在逐項清點邏輯不合理處，而是釐清科學與科幻的分界點，搭起現實與想像的橋樑。



圖1 加州理工學院教授索恩。
(來源：Keenan Pepper)

倏忽即逝的二十三年

電影中主角一行人所探索的第一顆行星有著驚世巨浪，這顆「大浪星」則繞著被暱稱為「巨人」的黑洞(Gargantua)旋轉，因為軌道半徑很小，相當靠近黑洞，因此隨船的黑人物理學家便警告主角，大浪星的一小時相當於地球的七年。而這，恐怕是電影裡最令人咋舌的橋段之一。

這番不等價的時間關係其來有自，它的名字叫廣義相對論。稱為「相對論」的理論其實有兩套，以「狹義」和「廣義」區分，其中心思想相同：將時間視為三維空間之外的第四座標軸。讀者可試想距離其實就是速度乘上時間，因此給定一個速度(比方說光速)，那麼時間單位即可詮釋為「光在這段時間內所行進的距離」，也就成了距離單位。因此，時間與空間本同而未異，合在一起成了時空。

相對論的「相對」兩字就來自於座標軸的變換，如果拿空間打比方，就像是一個長方體從不同的視角觀察，其截面積會不同，而時空亦是如此。根據變換成因之不同，相對論又再細分：狹義相對論所描述的，是觀察者與被觀察者間之等速度差所造成時空轉換的現象；而廣義相對論描述的則是由重力場所造成。

時空轉換的具體結果之一就是電影所描述的「時間延遲效應」。如果我們以旁觀者作基準，那接近大質量天體的被觀察者時間，相較於旁觀者來說會被拉長，儘管被觀察者永遠不會感覺自己時間的步伐有異，但如果像主角接近黑洞再遠離，那旁觀者會看到他的動作先變遲緩再回到正常的樣子。於是，

登陸大浪星的任務僅只是延誤了一、兩個小時，但永續號(Endurance)上守候的物理學家，卻苦苦等了二十三年。

科學家曾在1966年左右以實驗證實此現象，以電波雷達向金星發射訊號並測量其反射波的接收時間，當太陽位於金星與地球間時，回訊產生延遲現象，扣掉距離修正後剩下的就是受太陽引力場干擾而造成的時間延遲效應，相當符合廣義相對論所預測的結果。值得一提的是，狹義相對論指出被觀察者與旁觀者的速差也會造成時間延遲，1971年，科學家將兩個原子鐘(高準確度的時間測量儀器)校正後，一個放在地表上，一個讓飛機載上天繞地球一圈後回到原地，這個過程包括了飛機對地產生速差，以及海拔差異所造成的重力場變化，因此同時測量了廣義和狹義相對論的延遲效應，而實驗數據也符合兩個理論所預測的結果。

相對論離平常生活其實不遙遠，今日被廣泛使用的全球定位系統GPS就是一個例子。若沒有相對論修正地球質量、衛星速度等造成的時空擾動，GPS定位將產生極大誤差，導航更是癡人說夢！

誰說光線不會轉彎？

星際效應中另一個最令大家感到好奇的是巨人黑洞，但在談論黑洞前，讓我們先談一個與黑洞和相對論有關的現象：重力透鏡。

理論不僅預測時間在天體旁會延遲，同時還預測了光—即便沒有質量—在行經天體時仍會受重力場



圖2 執行飛機實驗的科學家以及原子鐘。(來源：維基百科)

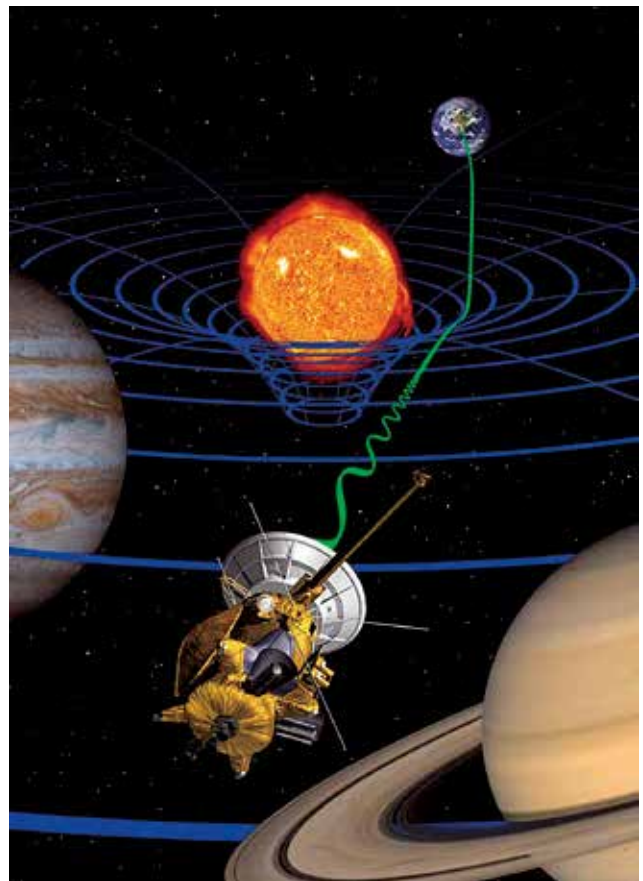


圖3 光受重力場偏折示意圖。圖中為卡西尼號土星探測船，其向地球發射之電波受到太陽重力場影響而產生偏折效應，改變前進方向。(來源：NASA)

影響而產生彎曲現象。如果讀者對此說法感到坐立難安，不妨想像小朋友玩的彈簧跳墊。當跳墊上沒有其他任何物體時，表面是水平的，如果上面彈彈珠，彈珠將直線前進；但如果我們在中間放一顆保齡球，跳墊便會下凹，這時彈射出去的彈珠將會

依照其速度、位置、方向順著跳墊的曲面運動，因此軌跡便會偏折，甚至有可能力道不足掉到保齡球旁。

光，或是其他有質量的物體與週遭重力場的關係便是如此。彈珠是光線，保齡球是質量天體，而跳墊曲面則是看不見的時空座標。當光或其他電磁波在太空中傳播時，天體的質量會扭曲鄰近的時空座標（也就是稍早提到的時空變換），質量越大，跳墊下凹越深，光線也就曲折得越厲害。

此番現象最早在1919年透過觀測證實。當時愛因斯坦剛提出廣義相對論不久，科學家們想到利用日全食亮度大減時，測量太陽背景亮星的位置，藉此驗證愛因斯坦的理論。如果理論為真，因日食時被觀察星體、太陽與地球幾乎成一直線，部份光線會被太陽引力「拉」回地球方向，進到觀測者的眼裡。又，人眼只能沿光線抵達地球的角度朝反方向

延伸定位，因此推算出的位置將會有所偏差，只要將日食期間的觀察結果與過往資料比對便可知道光線是否真的被「拉」了一把。偏折現象最後當然是被證實了，但最大的突破算是偏折程度相當符合理論預測。

此現象被稱為「重力透鏡」，太陽在觀測中扮演透鏡的角色，其自身質量所產生的重力場偏折光線，有如放大鏡聚光效果，故稱「鏡」。如果讀者疑惑為何日常生活中的光線從來不轉彎，那是因為要達到肉眼可覺的偏折尺度，透鏡質量必須至少為太陽質量的數百萬倍，而這對身於地球的我們來說根本不可能。然而觀察外太空的星球、星系時，光線在傳遞過程中勢必經過許多質量天體，因此我們仰頭所見之星空其實都是被重力透鏡「動過手腳」的，天文望遠鏡甚至拍過星系影像被重力透鏡扭曲而變成一個環

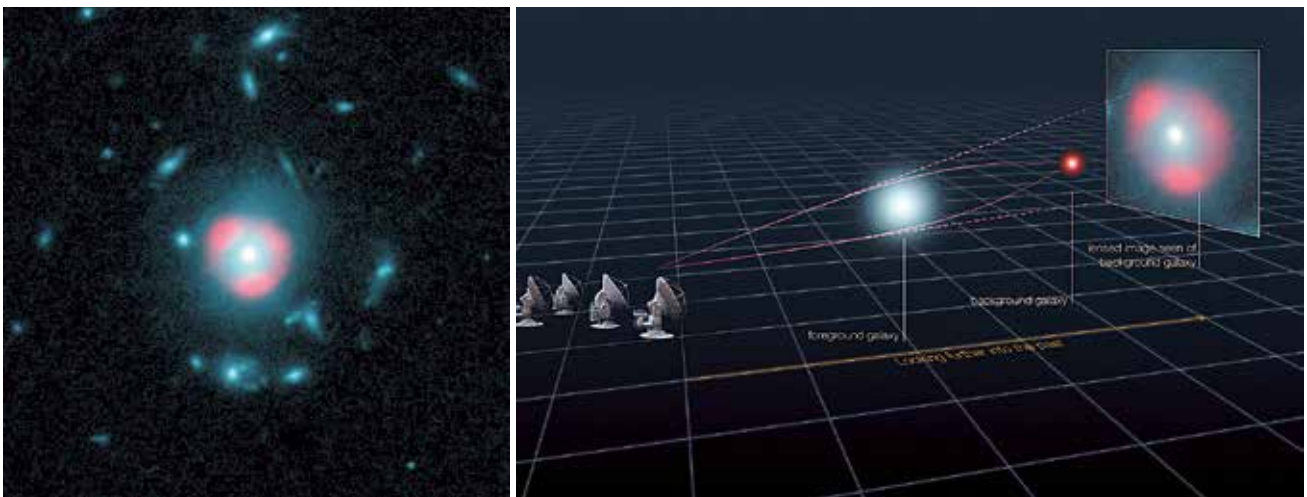


圖4-1、4-2 此圖為阿塔卡馬電波陣列(位於智利)所拍攝之影像。左圖中央可見一白點，為一星系，白點周圍可見紅環，此紅環亦是一紅色星系，位於白色星系的後方，離地球更為遙遠。當紅色星系發出光線經過白色星系時，因重力影響而強力曲折，導致星系影像不是常見的橢圓形，而變成了環，如右圖所示。此環被稱為「愛因斯坦環」，為重力透鏡效應的最直接證據。(來源：ALMA/ESO)



圖5 星際效應中巨人黑洞的特寫，除了黑色大圓餅之外，黑洞周圍的光暈似乎比想像得還多。(版權：Warner Bros. Pictures and Paramount Pictures)

的照片。今日，科學家正嘗試利用此一引力偏折現象來推估太空裡的質量分佈，藉此認識宇宙的歷史和組成。

黑洞到底長什麼樣子？

現在，請讀者想像一個大質量天體和一艘打算從旁飛過的太空船，如果太空船速度不足，則會被重力拖引最後墜毀在星體上，反之則可高速掠過，而兩者之間存在臨界點。此臨界速度與天體質量有關，質量越大，區分太空船命運的臨界速度也就越高。

但如果天體質量大到使臨界速度超過光速呢？相但對論裡假設任何物體或訊息傳播的速度均不大於光速，因此即便科技足以作光速飛行，太空船仍免不了墜毀的乖舛命運。於是，質量天體的周圍便形成了一圈禁忌領域，一旦進入就再也無法離開、無法傳出任何訊息，永遠斷絕對外聯繫。此時，這個禁忌領域就成為所謂的「黑洞」，因為連光線都無法倖免，故稱「黑」，因只進不出，故稱「洞」；而那危險的分水嶺，就被稱為「視界」，因為從外部的角度來看，此為視線之邊界。

其實黑洞一點都不黑，如果讀者還記得星際效應中的特寫，巨人黑洞的樣子比較像是搖著光呼拉圈、周圍又有好幾圈金環圍繞的大黑球。這番畫面是劇組用電腦模擬、計算方程式後所得到的結果；換言

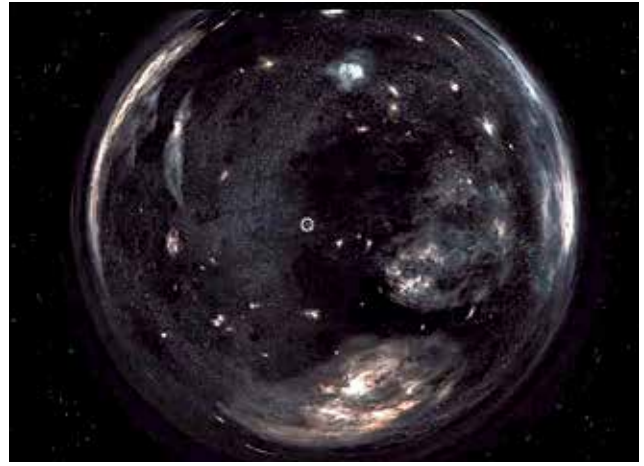


圖6 電影中所構想的蟲洞。
(版權：Warner Bros. Pictures and Paramount Pictures)

之，當主角從太空船朝黑洞望去，看到的有可能就是這番風景。那麼，這些光暈是從哪裡來的呢？

請各位想像一下太陽系，眾多行星繞著質量相對大的太陽公轉，是以黑洞周圍很可能也會形成類似的盤狀旋轉結構，被吸引的物質大抵為宇宙間的塵埃、氣雲、一些小行星或岩石等，只要他們不進入視界，便可以一直繞黑洞，就如同地球繞日公轉一般。然而，由於黑洞質量大，氣體、岩石的公轉速度勢必相當快，再加上黑洞潮汐力的拉扯下，很容易彼此劇烈摩擦而發光，於是便形成所謂的「吸積盤」，也就是電影裡發光的呼拉圈。

那黑球周圍的金環又作何解？還記得重力透鏡效應嗎？當吸積盤在發光旋轉時，黑洞後方那部份所射出的光線，有些或許直接被黑洞吸收，也有另一部份本該往其他方向射出，卻遭引力場偏折後大幅改變方向，最後進到觀察者的眼裡，有些甚至中途繞了黑洞好幾圈！於是，黑洞後方發光星體並非看不見，而是呈環狀出現在黑洞周圍，吸積盤是如此，坐落於黑洞後方的其他天體亦是如此。

所以黑洞存在嗎？

由稍早的內容讀者可發現，黑洞只是理論所允許的情況中，質量特別大的特例，星際效應裡所提到的另一個名詞「蟲洞」理論上亦可存在。蟲洞是連接

宇宙間兩個不同時空點的捷徑，最佳詮釋方式誠如電影所述，將一張紙曲折後捏起兩個點穿洞，這洞對生活在二維空間的螞蟻來說，便是跨越「時空」的捷徑。

所以黑洞跟蟲洞存在嗎？如果黑洞存在，理應當會產生重力透鏡效應；如果蟲洞存在，我們應該可以觀測到蟲洞產生的引力擾動或是從另一端傳來的微弱訊號或影像。只是，實際觀測這些現象極為困難，即便今日有高效能太空望遠鏡輔助，天文學家仍不曾直接觀測到這些結構。

那難道黑洞與蟲洞就僅只存在於想像中嗎？別急，蟲洞或許仍缺乏觀測證據，但天文學家找到了一些間接方法來偵測黑洞。比方說，氣體在吸積盤摩擦會射出相當大量的X光，而宇宙中有不少無法解釋成因的X射線光源，許多座落在不同星系的中心，便被認為是黑洞吸積盤所造成。又例如說，黑洞的大引力也會拉著很多星球繞著轉，藉由觀測這些星球的軌跡與動力行為，科學家得以計算星系中心的質量密度。有了這些觀測方法，現在科學家一般相信，我們所在銀河系的中心就是個黑洞！不過別擔心，地球完全沒有被吞噬的危險，黑洞並非吸塵器，已經與銀河系平安共存好一段時間了。

至於人類有沒有機會像電影一樣送探測船偵查黑洞呢？答案恐怕是否定的。在電影中，視界另一邊是小女孩房間書櫃後面的「五度空間」，但在現實生活中沒有人知道視界後面是什麼，只知道進去後就出不來，電影裡也一再強調此點。其次，地球距離所有

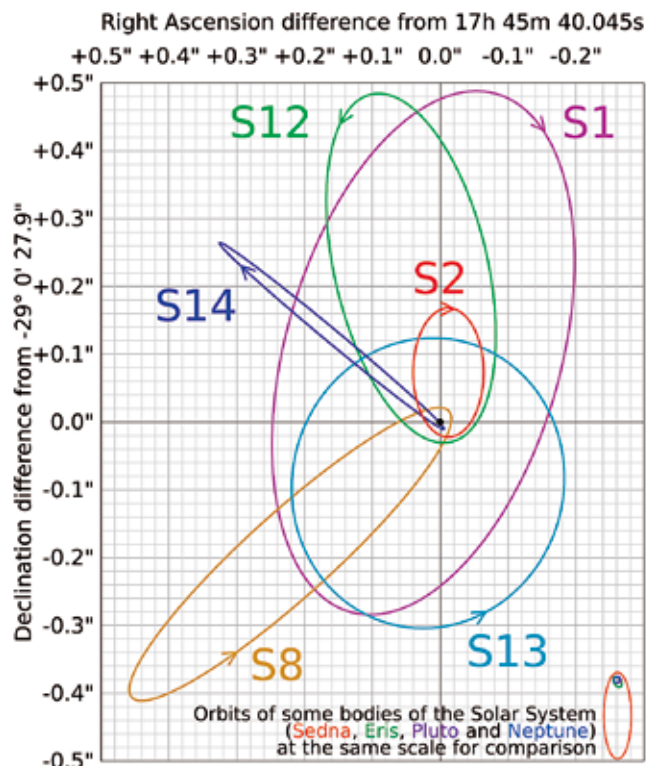


圖7 此圖標示出幾顆靠近銀河系中心的星球，在數年觀測下所勾勒出的軌跡。科學家發現這些星球均繞著同樣的天體旋轉，而軌道半徑相當大。圖右下角顯示了太陽系行星軌道在相同尺度下的大小，淺藍色為海王星，剩下皆為小行星。藉由測量軌道和觀察星體的亮度，科學家們可以估計銀河系中心天體的質量密度，而數據顯示為一超重黑洞。(來源：Cmglee)

已知的黑洞候選天體都太遠，如果不像電影中剛好有個蟲洞捷徑連接，哪怕再幾千年都無法到達。最後，就算撇開太靠近黑洞可能被潮汐力粉身碎骨的疑慮，視界外的人也永遠看不到探測船進黑洞的瞬間！還記得時間延遲效應嗎？越接近黑洞，時間延遲就越明顯，也就是說地球接收探測船訊號所需的時間就越長，而這個時間間隔將會隨著接近黑洞，在視界點上趨近於無限大。換言之，地球上旁觀者若朝黑洞望去，只會看到一艘太空船往黑洞靠近，卻越來越慢、越來越慢，最後幾乎靜止，永遠等不到進入的一天到來！

五度空間？

星際效應中不斷強調重力對時空感知的影響，如時空扭曲、跳躍時空的訊息傳遞等等，電影中用第五維度等於重力這個概念讓重力順理成章的和時間

與空間搭在一起，也順便賦予了重力許多奇幻魔力：讓主角從黑洞回到書櫃後、讓手錶的指針跳動等等。

這當然大多是電影想像，但在物理上，科學家的確想用所謂的第五空間來解決重力的某些問題。讀者首先需了解當今所有物理現象都可用四種基本力來解釋：強作用力、弱作用力（以上兩者均只作用在極短的距離）、電磁力以及重力。繼蘇格蘭物理學家馬克士威（James Clerk Maxwell）於十九世紀提出電磁學理論，發現電力與磁力其實是同一概念的一體兩面之後，二十世紀的物理學家又提出電弱理論同時將弱作用力與電磁力一網打盡，並且經實驗證實。自此之後，科學家便不斷努力想用單一理論（俗稱大統一理論）來詮釋所有基本力。將強作用力與電弱理論結合的理論已經存在，唯獨重力仍舊特立獨行、唯我獨尊。

對物理學家來說，要結合重力與其他基本力之難處有二。一是重力的強度遠遠低於其他三者，就彷彿從不同角度，若大小差異過大，很難會讓人相信是同一個物體一般；二是新理論必須考慮在大尺度下如何與廣義相對論接軌。於是，物理學家便猜想，如果這些基本力是在五維時空交互作用，而觀察者看到的只是四維投影，那有些問題便可迎刃而解。打個比方，就像蜜蜂在三維空間中飛行，地面上的螞蟻卻只觀察到二維軌跡一般。只不過五度空間理論本身仍有其他問題與爭議，再加上目前沒有有力實驗數據證明，因此仍停留在猜想的階段。

尋找系外行星

讓我們離開想像的第五維度，回到太空中。究竟宇宙裡有沒有其他適合人居的地方呢？會不會哪天人類真的需要往外太空尋找新住地？還是哪顆星球有外星生物的蹤跡？無論如何，這些都是天文學家關心的問題。

要尋找適合人類居住的地方，必須從行星下手。仰望星空，肉眼所見的諸多光點都被歸屬恆星的範疇。所謂恆星，主要為氣體所構成，內部旺盛地進行核融合反應釋放能量，因此發光發熱，如太陽一般，表面溫度通常為數千至數萬度不等，故不適人居。至於行星，為繞恆星運動的小型星體，有些有岩石表面，有些則仍由氣體構成，無核融合反應，因此表面溫度完全取決於與恆星的距離還有恆星輻射能的多寡。如果距離與輻射功率適中，行星上甚至有機會找到水等人類生存必須的要素。

但由於本身不發光，尋找系外行星困難重重，儘管科學界已有直接觀察到太陽系外其他行星的記錄，但絕大多數新發現靠的仍是間接方法。最常見的方法之一是觀察恆星亮度，有些亮度有週期性變化，每隔一段時間就會變暗一陣子，這往往是因為剛好有顆行星掠過表面，恰使地球、行星、恆星連成直線，影響光通量的緣故。另一個常見方法則是利用「都卜勒效應」，讀者一定都注意過救護車駛近和駛離時鳴笛聲音高不大相同，因為聲源與觀察者的相對速度影響了聲音的頻率，這就是都卜勒效應。同樣的效應也會發生在光上，當聲源變成光源時，音頻就變成光

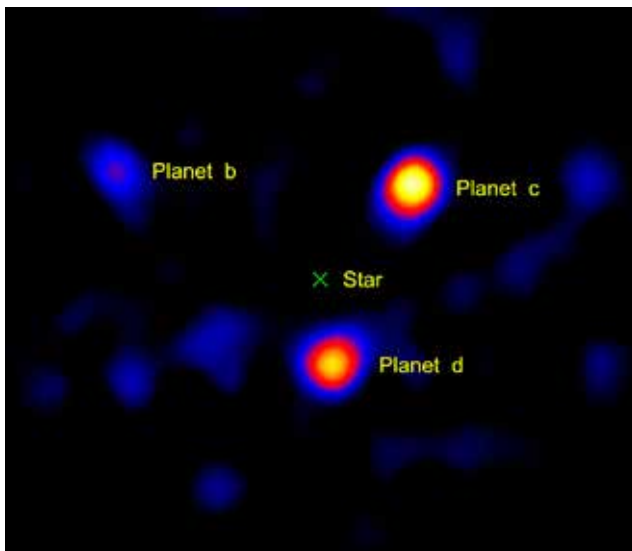


圖8 帕洛馬山天文台所拍攝的系外行星影像，影像經過處理除去中間的恆星(X處)。科學家可以經由不同時間點的連續影像來確認這三個周圍的亮點的軌跡，進而確認不是雜訊或其他恆星。(來源：NASA)

頻，也就是光的顏色。當行星繞恆星公轉時，恆星因受到行星牽引，也會產生微小晃動，對地球上的觀察者來說，此晃動會引發都卜勒效應導致恆星光譜錯移，天文學家便可藉此推測系外行星的存在。

除此之外還有許多包含重力透鏡效應在內的其他探測方法，在可直接觀測的情況下，科學家甚至可以藉由行星所反射的光譜推測星球表面有沒有水等人類感興趣的物質。現今科技對系外行星的了解，其實超乎社會的想像。

人造重力？

文章最後一個要討論的主題是人造重力，這並不是按下按鈕就會突然把東西往下吸的神奇機器；相反地，星際效應裡有一幕很清楚地呈現了比較實際的人造重力產生方式：主角一行人自地球升空後不久，本來到處飄浮的太空人回到座位各自繫好安全帶，隨後永續號便開始旋轉，自此之後所有場景都像在地球上正常站立行走一般。

這種利用俗稱的「離心力」製造重力效果的方式是可行的，就像洗衣機脫水時衣服往往會黏附在滾筒上一樣。離心力其實是個被誤解的名詞，從洗衣機外觀，衣服只是在往切線方向飛出去的同時，被

滾筒施以往中心的「向心力」而改變了方向；但對站在滾筒內側觀察的螞蟻來說，它只看到衣服黏在滾筒壁上，於是最合理的方式就是創造「離心力」這個名詞來解釋螞蟻觀察到的現象。如果螞蟻是人，而洗衣機是太空站，那離心力就變成了所謂的人造重力。電影的尾聲可以看到人類在圓筒狀太空站裡打棒球，整個世界都建築在圓筒壁內側，即欲利用旋轉來比擬重力的效果。但旋轉會帶來另一個問題，而這個問題要從颱風講起。

相信臺灣人對颱風一定不陌生，常注意衛星雲圖即可發現，颱風總是以逆時鐘旋轉。如果讀者有機會看到南半球的氣旋，就會發現這個趨勢變成了順時鐘。這是地球自轉所造成，若物體在旋轉座標系裡運動而觀察者也身處同座標系時，運動物體會仿



圖9 電影中的永續號探測船，利用旋轉模擬出與地球相仿的重力。(版權：Warner Bros. Pictures and Paramount Pictures)

佛被虛擬力側推而發生偏轉現象，這個虛擬力被稱為「科氏力」。儘管地球上的科氏力很弱以至於日常生活中不易察覺，但在天氣這種大尺度現象下卻難以忽略。於是，北半球雲氣由外而內移動時便向右偏轉，而當四面八方的雲氣匯集成氣旋時，就看到逆時針旋轉的圖騰，反之亦然。

當物體移動速度越大或座標系轉速越高，科氏力也就越強，偏轉也會越明顯。換言之，如果太空站不夠大，卻又希望人造重力場與地球相當，那太空站勢必以飛快速度旋轉，因此，電影中的棒球場景只能是美麗的幻想，不僅人在科氏力干擾下活動很容易產生頭暈現象，連球飛的軌跡都難以捉摸，只能說在太空站裡打棒球恐怕不是個好主意。

結語

從科學的角度來看，星際效應是一部內容相當豐富的電影，索恩教授對劇本的堅持讓我們看到了一部忠於物理法則的科幻作品，即使我們很難了解電影背後所有的科學要素，但只要有心，淺嚐知識大海之箇中滋味也並非遙不可及。

人類的好奇心和宇宙一樣無遠弗屆，儘管這些點點繁星對地球來說，是光要走好幾百年甚至上萬年才會到的距離，但這卻澆不熄天文學家無比的熱情。探索系外行星不容易，要實際登陸、甚至開發更是天方夜

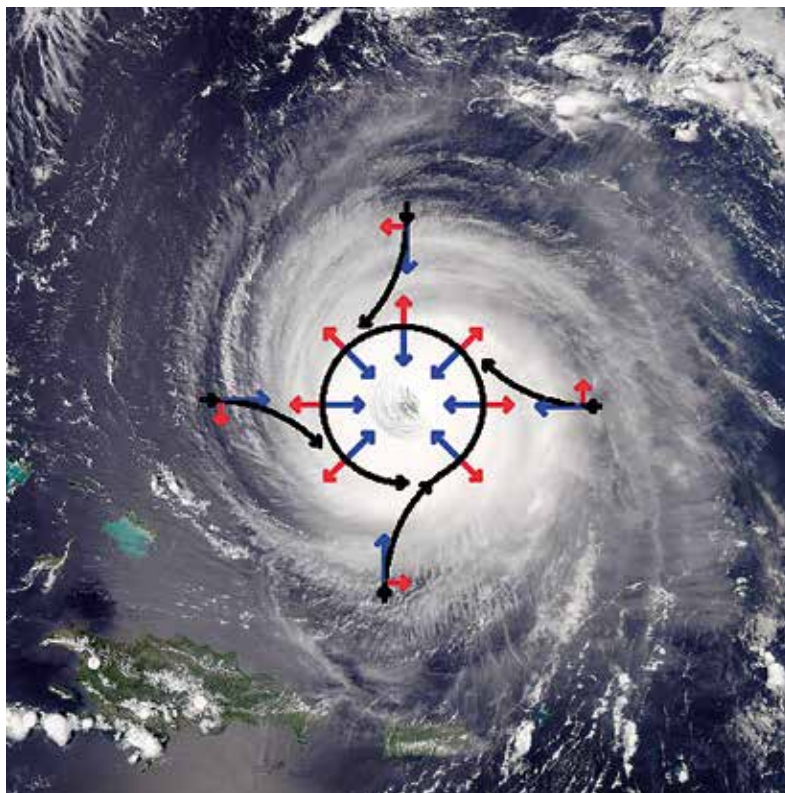


圖10 熱帶氣旋示意圖。圖為加勒比海地區的颶風，雲氣由外側往內移動時（最外側的四個藍箭頭）受到往右的科氏力（最外側的四個紅箭頭），使得雲氣順著黑箭頭「右轉前進」。當所有的外部雲氣一起移動時，看起來就像逆時針旋轉，如中間黑色箭頭所示。（來源：Titoxd）

譚，在人類科技尚未跟上野心腳步的同時，我們或許該好好想想，該如何與地球和平共處，至少在展開星空大冒險前，對故鄉故土，保有一絲尊敬。

參考資料

1. Binetruy P. M. R. (2007). "Supersymmetry: Theory, Experiment, and Cosmology" (1st ed.). Oxford University Press.
2. Dodelson S. (2003). "Modern Cosmology". Academic Press.
3. Dyson F. W., Eddington, & A. S., Davidson C. (1920). "A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of 29 May 1919". Philosophical Transactions of the Royal Society, 220A, 291.
4. Eisenhauer F., Genzel R., Alexander T., et al. (2005). "SINFONI in the Galactic Center: young stars and IR flares in the central light month". The Astrophysical Journal, 628, 246.
5. Hafele J. C. & Keating R. E. (1972). "Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains". Science, 177, 166.
6. Hafele J. C. & Keating R. E. (1972). "Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains". Science, 177, 168.
7. Shapiro I. I. (1964). "Fourth Test of General Relativity". Physical Review Letters, 13, 789.
8. Shapiro I. I., Pettengill G. H., Ash M. E., Stone M. L., Smith W. B., Ingalls R. P., & Brockelman R. A. (1968). "Fourth Test of General Relativity: Preliminary Results". Physical Review Letters, 20, 1265.
9. Thorne K. & Nolan C. (2014). "The Science of Interstellar". W. W. Norton & Company.