



## 支配宇宙的力量

陳文屏  
李知昂

主講  
整理

### 引言

很多有趣的問題是小孩提出的，比方說星星為什麼不會掉下來？這個問題很童趣，但猛一聽怎麼回答呢？其他類似的問題，諸如星星為什麼會發光，天空為什麼是藍色的等等，對於幼稚園小朋友、小學、中學生、大學生而言，皆有不同回答方式，也都可以成為科學家長期研究的題目。

這裡希望從天文學的角度，運用在數學、物理、化學課等學科到的知識，來說明是哪些力量在支配天體的生老病死。以下讓我們先來看星星如何，以及為何運動。

### 星體的運動

我們所居住的地球是個行星，除了繞著太陽公轉以外，也不斷自轉，它轉得有多快呢？這當然不難算，赤道周長約四萬公里，自轉一周約二十四小時，所以赤道自轉的運動時速大約有一千多公里，這比噴射客機航速還快，但是沒有阻力，所以我們在地表上跟著自轉不會有感覺。地球繞太陽公轉的軌道半徑為一億五千萬公里，繞一周三百六十五天，則時速高達十萬公里，同樣我

們沒有感覺。此外，太陽繞著銀河系中心運轉，時速高達七萬公里；而銀河系繞著星系群的中心運轉，時速更高達三十萬公里，快得不可思議。宇宙目前處於膨脹狀態，所以距離愈遠的星系，遠離我們而去的速度愈快。我們所能觀察最遠的宇宙，離去的速度達到光速。

太陽的半徑足有七十萬公里，約是地球的一百倍，所以體積便約是地球的一百萬倍。但這樣大的太陽，離最近的恆星距離，尺度是它半徑的一億倍。一億倍有多遠呢？打個比方就像在台灣和菲律賓，各放了一顆網球，彼此之間非常空曠，幾乎沒有機會碰在一起。上千億顆像太陽這樣的恆星，由於彼此的萬有引力，繞行在一起，和恆星之間的稀薄雲氣，一起構成了星系。我們所在的星系特稱為銀河系，大小跨越了五萬到十萬光年。星系之間的距離僅有約百萬光年，亦即只約半徑的十倍，因此星系撞在一起的機會很高。

當星系相撞時，恆星還是不容易相撞，但是星際雲氣就不同了。因為氣體的分布廣，所以當星系碰撞，雲氣就會攪得一塌糊塗。太空中有很多這些星系相撞的情形，尤其在宇宙早期，當時宇宙體積小，碰撞的機會更高。

#### 四大基本作用力

宇宙萬物到底是誰在支配？古人不懂風雨雷電的原理，把不知道的事情都歸諸神靈，時至今日，我們雖然仍有許多不懂的事情，但是科學知識與時俱進，讓我們談談就目前所知，有哪些力量支配著宇宙萬物的運行。

讓我們先給宇宙下個簡單的定義：包括能觀察到的，以及會影響我們的所有東西，它們所佔據的空間，和彼此交互作用造成的一系列因果關係，就是宇宙。因果關係當然就是時間的概念。這一點，中文說得好，「宇」就是「上下四方」，而「宙」即為「古往今來」，也就是空間和時間。英文的 universe，其中的 uni- 字根有單一、獨特之意，表明宇宙的獨一性，不過以我們現在對宇宙的了解，沒有理由時空非得獨一無二，在這個宇宙之前或之後可能有別的宇宙，甚至現在就可能存在物理定律、化學組成完全不同，也就是平行的宇宙。如此一來，universe 就要改成 multi-universe 了，中文的「宇宙」一詞則仍然適用，顯然高明些。

剛剛用了許多數字來描述星星的運動與距離，現在來說明支配宇宙的力量，要進入物理學範疇。我們都知道身邊有許多力量，例如水力、風力，並不是在最小尺度的基本力，目前物理學上的基本作用力只有四種，也就是萬有引力、電磁力、強作用力，以及弱作用力。要了解什麼是基本力，就要先知道我們的身體其實和花草、泥土、天上的星星、太陽，所有的東西，都是相同的元件所構成，好像積木一樣，能夠拼湊出不一樣、很複雜的東西。這些相同元件是質子、中子和電子，基本力就要從這些小粒子說起。

首先說強作用力。這個基本力和之前提過的，「恆星為什麼會發光？」這個問題有關。我們都知道，太陽作為一顆恆星，其照耀的巨大能量來自內部的核融合反應。核融合反應是什麼？

我們都知道原子核是帶正電的，它們彼此間會互相排斥，距離愈近，排斥的力量愈大。那麼原子核怎麼能夠彼此融合呢？原來當原子核靠得很近的時候，也就是當彼此距離和原子核本身大

小相當時，有一種比互斥的電力更強的吸引力，稱為強作用力。幸好有強作用力，才能把質子和中子緊緊束縛在原子核裡，有了不同數目的質子和中子，便產生了各種不同的元素與同位素。當原子核彼此快速接近，突破了正電相斥，進入強作用力可以作用的距離，巨大的吸引力就把兩個原子核彼此間抓得更緊，融合成新的原子核，這時原子核處在比較低能量的狀態，因此釋放能量，這就是核融合產生的能量。恆星的中心不斷進行氫融合成氦的核反應，雖然每次反應產生的能量不多，但是因為參與作用的氫氣極多，因此產生大量總能量。太陽內部產生的能量從表面輻射出來，我們就看到了明亮的太陽。

接著要談的是弱作用力。顧名思義，它比強作用力弱，也在原子核尺度作用，造成原子核產生衰變，變成另外一種原子核。可以說，宇宙中有多樣元素，以製造出多采多姿的各種東西，全靠強作用力與弱作用力彼此相輔相成。

另外兩種基本力大家耳熟能詳，就是電磁力和萬有引力，萬有引力又常被稱為重力。重力和電磁力非常不同。首先兩者強度差得很遠，拿構成氫原子的質子和電子來說，它們之間有電力相吸，也有重力相吸，兩者哪一個大？當然電力比較大。不過若問大多少？那就嚇人了，答案是十的四十次方倍。具體來比喻，如果重力的強度相當於一巴掌拍桌面，氫原子當中的質子與電子間的電力強度，差不多等於把整個銀河系搬來壓到桌面上。

不過電磁力雖強，它和重力之間的第二個差異，卻會削弱它的影響。這個差異就是電力與磁力同時具有吸力和斥力。在原子尺度，電磁力是比重力強沒錯，但質子和電子藉著電磁力一結合

成原子，從大尺度來說就變為中性，吸力和斥力會彼此抵銷。這也就是為什麼，雖然我們每個人身上都有無數質子與電子，我們還是敢握手，不用擔心你強大的電磁力。太陽包含了十的三十次方公斤的物質，中心溫度超過攝氏千萬度，表面溫度也高達攝氏五千多度，物質都被分解成帶電的氣體，在地球的距離卻沒有感受到電力，卻受到重力牽引，而繞行太陽。

四種基本力中以重力最弱，但看最後結果，強作用力和弱作用力的作用距離極短，電磁力作用距離遠但會抵銷，反而是重力，因為不會抵銷，只要有物質就會產生相加的效果，在大範圍情況，反而成為真正支配宇宙的基本力。

我們都知道波是種傳遞能量的振盪現象。振動的介質可能沒有大規模移動，但能量因此傳遞出去。就像用繩子產生繩波，繩子上下振動，力量與能量傳了出去，但是繩子本身沒有移動。電磁波也一樣，只是它不需要靠繩子，在真空中也可以傳遞。物理學告訴我們電場改變（振盪）會產生磁場，而磁場振盪則會產生電場，兩者震盪就產生電磁波。最常見的電磁波就是我們平常看到的光線，而平常電視、手機的訊號，微波爐的加熱來源，都是電磁波，只是震盪的頻率不同。

研究天體的性質，除了極少數能夠取樣回實驗室，其他都靠分析它們發出的電磁波來探討它們的性質。從以上討論大家可能有個體會，主要支配宇宙結構的，是物質所造成的重力，決定了恆星如何誕生、衰亡，如何運動，也主導星系的運動與聚集。然而物質不見得發光，而我們所看到的宇宙，則是電磁的面象。而恆星之所以發光，則是因為強作用力的結果。這給人生的啟發，就是具影響力者，不見得光芒耀眼。而發光的人，裡子總有強烈的力量，雖然遠遠地看不出來！

### 恆星的生老病死——基本力的展現

前面說到恆星間的距離，約是其半徑的一億倍，中間是太空，雖說是「太」空，卻不是「真」空。恆星之間的太空有哪些東西呢？我們呼吸的空氣，每立方公分（約小指尖大小）約有十的十九次方個分子，但星際太空則只有大概一個，實在極其稀薄，比目前地球上任何實驗室能達到的「真空」都還稀薄。

星際間的物質雖然稀薄，但重力讓氣體彼此吸引，愈聚愈密集。雖然時間可能很長，但是等到氣體濃度達到每立方公分幾萬個分子的時候，雲氣中的灰塵就開始會擋到光了，原來後面的星球被擋到，我們也才觀察到「星際暗雲」。它的溫度極低，大約只有攝氏零下兩百六十幾度，也就是僅比絕對零度高個十幾度。

這張照片可以清楚見到星際暗雲。大型天文望遠鏡對著太空長期曝光，會出現比平常看到多得多的星星，密布在星空中，而且閃耀著不同的顏色。這時，擋住星光的星際暗雲（P2，圖一），也就浮現出來。我們怎麼知道是星際暗雲擋住星光，而不是那塊天區恰好沒有星星呢？證據是紅外線感光的照片，因為星際暗雲中的灰塵雖然有效阻擋我們眼睛能感應的可見光，但是紅外線的穿透力比較好，所以用紅外線感光來拍攝的話，便有機會看出，星際暗雲後面確實有許多星星（P2，圖二）。

再看這張獵戶座的照片，中間三顆星星是大家最熟悉的獵人腰帶。星星之間的連接線當然是不存在的，只是示意如何把星星構成的圖樣想像成獵人。腰帶下方，俗稱獵人配劍之處（P3，

圖三），在晴朗的日子，使用小望遠鏡就可以看到雲氣。因此很多人喜歡觀察獵戶座，不是沒有理由的。獵戶座是個值得觀察的區域，不但包含了瀕臨死亡的巨星參宿四，也可以看到正在誕生恆星的雲氣。構成獵戶座的星星，其實在太空中彼此距離非常遠，只是從我們的角度看，它們剛好投影相近而已。

也許有人會問，星際暗雲既然會擋光，怎麼看獵戶座的照片，雲氣卻發亮呢？這跟恆星的誕生有什麼關係？這是因為暗雲當中一旦有恆星產生，就會被照亮。首先，暗雲因為自身的重力而收縮，旋轉愈來愈快，就像花式滑冰選手，本來把雙臂打開來轉，忽然把雙臂收縮，就會轉得很快。收縮的暗雲加速旋轉，便使得暗雲成為扁平的形狀。附帶一提，正是這個旋轉產生離心力，才讓行星得以圍繞在太陽四周，而沒有被太陽的重力給吸進去。從這個觀點來看，我們能不墜落到太陽上，其實也得歸功於當初雲氣的旋轉。

回到恆星的誕生，話說雲氣收縮使得中心溫度升高，而旋轉的影響則是讓氣體雲從接近球形變得扁平。中心的溫度從攝氏零下兩百六十幾度，上升到攝氏數百萬度時，原子核彼此的相對速度就很高了，因此便有機會突破正電的排斥，讓強作用力形成核融合。

當氣體中心溫度高到可以產生核反應，會發生什麼事？當然，會放出許多的能量，也就是說，它會發出光和熱。更重要的是，它散發的能量會給予自身膨脹的壓力，就能跟重力的收縮抵消了！至此我們有了一顆穩定的「恆」星。恆星的存在，主要就是由氫原子核進行融合，放出能量。為什麼是氫？因為它最簡單，把質子和電子以低密度混在一起，最多的情況自然就是一個電

子繞一個質子，所以氦也是宇宙中最多的元素。而在恆星內部的高溫高壓下，氦核首先兩兩相撞，在很短的時間內又撞到第三個，撞到第四個，便會融合成氦。最後的淨反應就是四個氦轉變成一個氦。而那個巨大的氣體圓盤，其他的地方又如何呢？結果是靠著離心力沒有掉到恆星裡的物質，也可能自己找個中心收縮，最後就產生行星。

只要恆星內部還能進行核融合反應，就有能量抵抗重力收縮，這就是穩定的恆星。核融合的燃料可以供應多久，恆星就能存在多久。但如果當初彼此吸引形成星球的氣體不夠多，以致雲氣中央無法點燃核融合反應，會怎麼樣？會變成不能發光的星體。木星就是我們身邊極貼切的例子，它的成分與太陽類似，都是氦氣與氦氣構成的氣態球體。科學家猜想木星的質量如果再大十倍，或許就能點燃核融合反應，太陽系也會因此變成雙星系統。

前面說過，當核融合的燃料燒完，重力就再度主導。因此說重力支配了恆星的死亡，一點也不為過。不過在探討恆星的死亡之前，還得先深入談談恆星恆久存在的理由，以及為何有各種不同的恆星。

恆星如何恆久存在？因為它是個處於穩定態，每一部分都是穩定的。接近中心處融合反應最旺盛，因此抵抗重力收縮的膨脹壓力也最大，接近表面的部分氣體溫度不那麼高，抵抗重力的壓力也是剛剛好。內部溫度高到引發核融合反應，就會釋放能量。外層的氣體吸收這些能量，一方面吸收能量，讓氣體維持高速運動，產生熱壓力，另一方面則將能量傳遞給更外層的氣體，如此一直向外傳遞，溫度愈來愈低，當低於攝氏幾百萬度，就不會再行核融合反應。拿太陽做例子，它

只有半徑四分之一以內的部分，正在進行核融合反應。外層的氣體不斷吸收內部傳遞出來的能量，直到最外層的氣體太稀薄，因此光與熱便輻射到太空，這個區域溫度約攝氏五千多度，這就是我們所見到的太陽邊緣。這個從不透明過渡到透明的區域，足足有幾百公里的厚度，但這和太陽七十萬公里的半徑相比小得多，因此看起來太陽似乎有個銳利的邊緣。

至於各種不同的恆星，則是因為質量不同，發光的情形也不同。我們可以從比太陽大得多的那些講起，它們因為重力更大，中心核融合反應更劇烈，能量產生得快，表面就會很明亮，表面溫度就會很高，主要呈現藍白色光芒。例如織女星、天郎星這些都是藍白色的恆星，它們表面溫度高達幾萬度，都是大質量的恆星。

我們的太陽屬於小質量恆星，發出橙黃色光芒。大質量恆星雖然燃料多，卻由於核融合消耗的速率快，反而壽命短。有如熱含量高的汽油，雖然燃燒起來烈火騰騰，但是卻不耐久燒，一下就燃燒殆盡；不若炭火，雖然火光不亮，卻可以持續比較久。大質量的恆星雖然耀眼，但壽命很短。相反地，太陽雖然暗，卻很長壽。發藍白光芒的恆星壽命可以短到甚至只有千萬年，太陽的壽命卻長達一百億年。目前太陽已經照耀了約五十億年，還可以繼續活五十億年。

談完恆星的存在，接著講到它的死亡。如前所述，恆星的一生都在進行融合反應，把低原子量的較輕元素融合成更重的元素。因此當核融合反應區內的燃料用完的時候，就是它壽命結束的時候。以太陽為例，只要半徑四分之一以內的核融合結束就算結束了。不過因為外圍仍有許多氦原子，重力使整個星球塌縮下去的時候，溫度再度升高，又會引發外圍的氦核反應，使得星體膨

脹。小質量恆星會以緩慢的速度膨脹，把外圍的氣體拋向太空；大質量恆星則以高速膨脹，甚至爆炸，這種爆炸的現象，就是所謂的超新星。超新星爆發時，亮度相當於整個星系，古人誤為新誕生的星球而名之，超新星其實不「新」，而是垂老恆星死亡前的迴光返照，超新星甚至不是「星」，而只是臨死前奮力一擊的驟亮現象。

因此星球的質量一開始就決定這顆星球會怎麼誕生，怎麼存在（多耀眼、活多久），以及怎麼死。像太陽這樣的恆星，最後塌縮的中心會剩下一顆很熱、很暗的小星球叫「白矮星」，而膨脹的外圍則是「紅巨星」，最後外圍被噴發到太空，成為「行星狀星雲」。比太陽大一些，中等質量的恆星則會產生更劇烈的超新星爆發，中間則塌縮成「中子星」。更大質量的星球，連中子也無法支撐它塌縮時的重力，最後中心就會成為「黑洞」。質量決定了重力，而重力則決定了恆星生老病死的命運。

無論是緩慢噴發的行星狀星雲，或是劇烈的超新星爆炸，透過這些過程，恆星會把一生融合形成的重元素，又拋回太空裡去。這些雲氣然後再度聚集，形成新的星球，周而復始，唯一差別就是其中的重元素含量愈來愈多。我們身上鈣、鎂、鐵、鈉這些元素都比氫重得多，全是久遠前的恆星造出來的，可見你和我都是好幾代以後星球的產物了。如此看來，誰能說自己和星星的關係不密切呢？

## 暗物質

重力不只掌握恆星的生老病死，也支配著大尺度的宇宙。千億個恆星構成星系，許多個星系又會構成星系群，星系群又會構成更大的超星系群，宇宙中的東西都傾向於成群擠在一起，這都是重力的緣故。如此的構造可以非常巨大，比方天文學家會把星系的分布繪成三度空間圖，有些地方空空的，有些地方好像星系特別多，就像海綿一樣，有中間的空洞，也有海綿壁。海綿壁的地方星系特別多，甚至有些這些結構綿延很長，甚至可以綿延數億光年。有一處甚至被暱稱為「長城」，它是天文學上的大尺度結構。

不過以上講的仍是會發光的物體，但宇宙中還有很多東西根本不發光。這裡講的光，泛指所有的電磁波，一般而言，不發出電磁波的物體我們無法知道它的存在，但當它的巨大質量把附近的物體吸引過去，我們還是可以推測這些暗物質的存在。從一九五〇年開始，就有觀測證據顯示宇宙中存在暗物質。

這觀測證據是什麼呢？以太陽系為例，因為它的質量大都集中於中心，所以離太陽愈近的比方說地球、木星，公轉的速度就快。離的遠的如天王星、海王星，公轉速度慢，這就是所謂「刻卜勒定律」。原因是，重力與距離的平方成反比，距離中心愈遠，重力愈小，用來抵銷重力所需要的公轉速度也就跟著愈小。

但是銀河系以及其他星系的運動狀況就不同了。據觀測星系外圍恆星的公轉速度，比預期的還快。即使在遠離中心一段距離之外，已經看不到星系的光，星體運動的速度卻不變慢，而維持幾乎一樣的速度，這和太陽系中行星的運動完全不同。這是怎麼回事？

科學家認為星系周圍存在不發出電磁波的物質，正是因為這些物質的質量，產生重力，才會讓銀河系外圍的恆星，維持快速公轉。這就是暗物質的存在證據，但是我們不知道它的分布情形，也不知道它組成成分為何，但是確定暗物質存在，因為我們可以看到它的重力效應。

上面所說的支配宇宙的力量，都和重力——萬有引力有關，也都和質量有關，包括暗物質存在的證據。「萬有」引力這個說法真是好，所有物質都有這種力，它也支配大尺度宇宙的絕大多數現象。我們甚至可以結論說，支配宇宙的力量就是重力。不過最近的天文物理，卻有意外的新發展。

前面說過宇宙處於膨脹狀態。處於膨脹的狀態並不奇怪，比方說把一個硬幣向上丟，就會處於一個向上移動的狀態，這時重力還在作用，使得硬幣一直變慢，而且可能會掉回來我們的手中。既然宇宙中有重力，便永遠受到內縮的吸引力，那麼它是不是愈膨脹愈慢，有一天會縮回來？還是它愈膨脹愈慢，但始終不會縮回來？所謂的「哈伯定律」正是說明宇宙目前處於膨脹狀態。理論上，宇宙的總質量決定它的重力是否終有一天停止它的膨脹，讓它縮回來。

但是過去幾年，卻有個熱門的發現，碰巧也用了暗這個字，那就是暗能量。暗能量指的是什麼？原來最近藉著觀測更遙遠、也就是更久遠以前的星系當中的超新星，藉此估計這些星系的距離，發現以前的宇宙膨脹速度比較慢，也就是宇宙居然愈膨脹愈快！這真是出人意料，我們研究了半天，以為大尺度宇宙下只有重力會作用了，即使宇宙在膨脹，也是會愈來愈慢，現在竟然發現它愈膨脹愈快！是不是有一種能量，提供了斥力，抵銷了重力的作用而有餘？它是第五種基本

力嗎？還是一個新的維度？或只是重力在更大尺度下的另一種表現？我們並不清楚，只有期待更進一步的觀察和研究，能為我們解開這個謎團了。

研究支配宇宙的力量，真是個充滿挑戰的過程，不是嗎？