

暗物質是什麼東東？

陳文屏（中央大學 天文所、物理系）

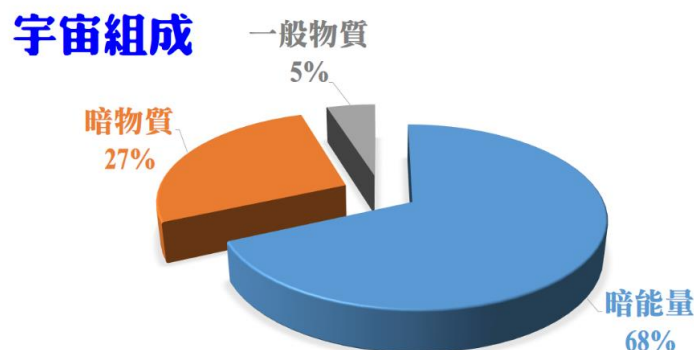
前言

1998 年筆者在「物理雙月刊」寫了「宇宙社會的黑暗面——談暗物質」
(http://www.astro.ncu.edu.tw/~wchen/wp_chen/essay/DarkMatter.htm)，文章一開始就說：

天文學在過去 20 年的一項重大發現，就是宇宙中數量最龐大的物質，可能不是我們所熟悉的發光物質，例如恆星、星雲、星系等所組成，而是由我們目前還不知道形式、性質的物質所組成。我們之所以知道這些物質的存在，純粹是因為它們的重力效應，而不是因為它們所發出的電磁波，天文學家稱這些物質為「暗物質」(dark matter)。

將近廿年過去了，這段文字依然成立，也就是科學家目前仍不明白暗物質為何物。十九世紀末倫琴 (Wilhelm Röntgen) 發現新種類的輻射，名為 X 射線，表示性質未知。中學時解方程式常以 X 代表未知數。日常生活也聽到「X 教授」、「X 夫人」、「X 檔案」，都是神秘、未知的意思。近來見到的「暗物質」與「暗能量」(dark energy) 則以「暗」來表示未知。

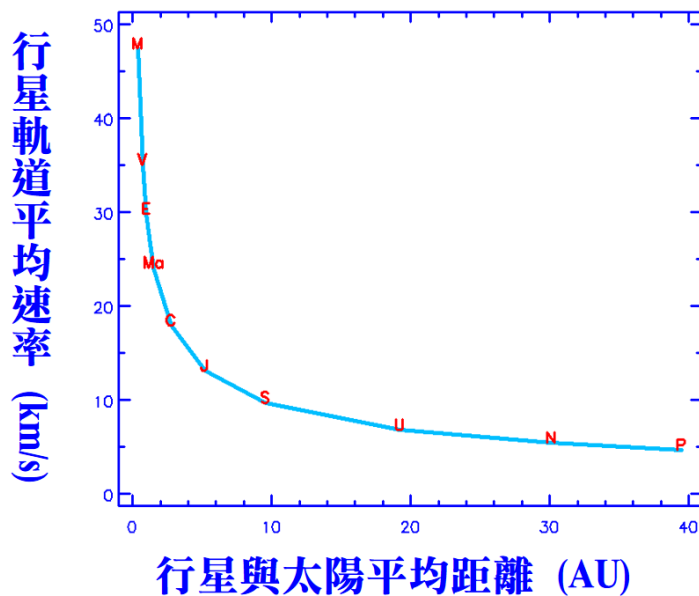
圖一顯示目前所知的宇宙組成，其中只有百分之五是我們熟知由原子、分子構成的「一般物質」，由於這些乃由更基本的質子與中子（稱為「重子」）組成，因此也稱為「重子物質」(baryonic matter)。宇宙的另外兩種組成，其中暗物質是本文主題，這些物質不發光或其他波段的電磁波，也不與電磁波交互作用，但是它們跟一般物質一樣具有萬有引力，所以會影響其他物質的運動，提供暗物質存在的證據。至於暗能量我們知道得更少，不在本文討論範圍。



圖一：宇宙組成包括了為數眾多的暗能量，本文所介紹的暗物質，以及由原子、分子構成的一般物質。

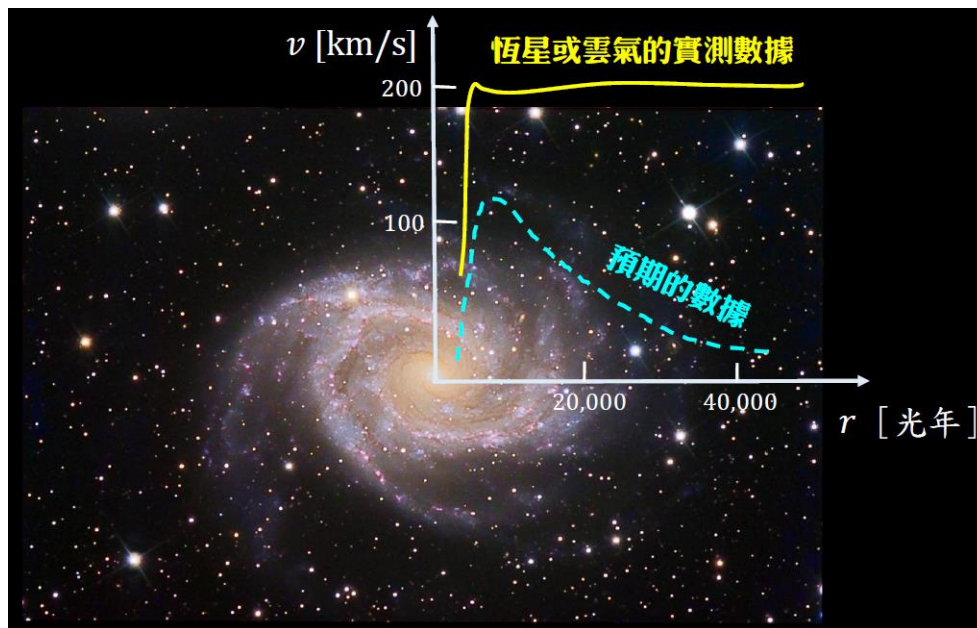
暗物質存在的證據

先看看我們瞭解的東西。當質量為 m 的物體以距離 r 與質量大得多的另一物體 M 互繞，當吸引 m 的向心力 mv^2/r 等於兩者之間的萬有引力 GmM/r^2 ， m 就能夠維持穩定圓周運動。其實相同大小的萬有引力作用在兩個物體上，但由於 $M \gg m$ ，我們忽略 M 的運動。兩個力量相等表示 $v \propto \sqrt{M/r}$ ，也就是說 m 的運動速率與距離的根號成反比。這符合直覺，因為距離遠者，受到的引力小，當然只能跑慢一點，才能維持在軌道上。圖一顯示了太陽系當中的天體的軌道速率，與離太陽的距離的關係。軌道速率的變化。注意這裡 M 是太陽質量，這對所有這些天體都是定值。



圖二：太陽系行星軌道速率與離太陽距離的關係，包括水星 (M)、金星 (V)、地球 (E)、火星 (Ma)、木星 (J)、土星 (S)、天王星 (U) 與海王星 (N) 等行星，以及穀神星 (C) 與冥王星 (P) 等矮行星。地球與太陽的距離定義為 1 AU。

1960 年代開始，Vera Rubin 以及合作者 Kent Ford 測量螺旋星系的旋轉曲線 (rotation curve)，也就是天體運動如何隨著離中心距離而改變。圖二繪出 M33 這個星系的結果，圖中橫軸是天體離星系中心的距離 (半徑)，縱軸則是運動速率。其中速率可經由光譜的都卜勒效應而估計，例如測量恆星光譜，或是在星系外圍缺乏恆星之處則測量雲氣的運動。圖二的背景是該星系的可見光照片，顯示的是恆星的分布。從觀測數據可以看出在某半徑之內，越往外面天體跑得越快，而在這之外，在星系外部即使已經沒有光線之處，旋轉曲線趨於平坦，甚至有點上揚。



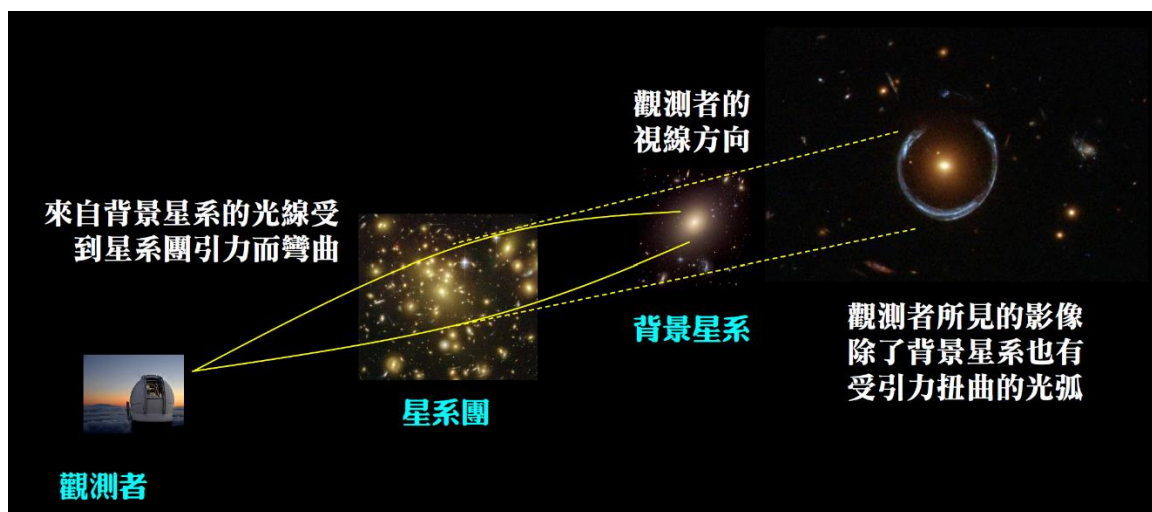
圖三：螺旋星系的旋轉曲線。背景是可見光影像，上面的曲線是觀測數據的示意圖，下方則是基於星系光亮部分（恆星）所預期的曲線。本圖參考了 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M33_rotation_curve_HI.gif 的概念

這讓人不解，因為根據牛頓力學得到的結果 $v \propto \sqrt{M/r}$ ，當 M 為常數，就該有「越往外越慢」的情形，如圖一的行星運動。觀測顯示星系內圍 $v \propto r$ ，這表示質量的分布 $M(r) \propto r^3$ ，也就是半徑越大，所包含的質量越多，呈三次方增加，由於一般星系中央有橢球結構，所以「體積越大質量也越大」可以理解。但是星系靠外部的旋轉還能維持相同的速率就不尋常了，因為平坦的旋轉曲線表示「越往外所包含的質量越多」 $M(r) \propto r$ ，可是那裡已經沒有發光物質了呀！這表示有某種不發光的物質包圍在星系四周。

對於重力束縛的系統，萬有引力將彼此拉住穩定運動，那麼總質量越大，動得最快與最慢的成員，彼此的速率差距就越大，這個速率差距的範圍稱為速度彌散 (velocity dispersion)。橢圓星系當中的恆星運動複雜，不像螺旋星系盤面上軌道運動相對簡單，可以個別測量。但是測量某橢圓星系整體的速度彌散，便可以估計該星系的總質量。實測結果發現很多橢圓星系及球狀星團的速度彌散程度，無法用看到的總光度來解釋。其他暗物質存在的證據來自星系團，早在 1930 年代瑞士天文學家 Fritz Zwicky 就曾經測量星系團當中個別星系的運動，發現徑向速度的差異，大於總共發光物質所能解釋。這些都提供暗物質存在的證據。

廣義相對論主張物質讓空間彎曲，而物質與光線皆沿著彎曲的空間運動。物質的運動展現的就是萬有引力作用，而光線因為沒有質量，照理不會受到引力影響，但是實驗證實光線的確會受到質量（引力）彎曲。在 1936 年愛因斯坦發表理論預測之後，1937 年 Zwicky 提出星系團可能造成「重力透鏡」(gravitational lensing) 效應，直到 1979 年由觀測證實。星系團包含了 10^{14} 到 10^{15} 太陽質量，龐大的萬有引力足以將後方星系發出的光線「偏折」到我們視線方向。觀測者除了看到背景微弱的星系影像，部分星系發出，原本無法進入我們視線的光線，因為偏折而讓我們看到，但是這些光線經過扭曲，已經不再是完整星系的形狀，而常成光弧，如圖四所示重力透鏡的原理。

圖五展示某個星系團的重力透鏡效應。由這些光弧，可以估計星系團的總質量（重子物質加上暗物質），發現除非有暗物質存在，否則光線偏折的程度不符合只有發光物質的數量，這又是暗物質存在的證據。



圖四：重力透鏡示意圖。星系團的引力使得來自背景星系的光線彎曲，而進入地球觀測者的視線



圖五：(左) 哈伯太空望遠鏡所拍攝距離我們 22 億光年之外，名為 **Abell 1689** 星系團的可見光與近紅外影像，除了個別星系，仔細看可以看到重力透鏡現象所造成的光弧。(右) 與左圖一樣的影像，另以紫色標示利用重力透鏡所推測出星系團該有的質量與其分布，有很多地方沒有光線卻有大量物質。

<https://www.spacetelescope.org/images/heic1014a/>

暗物質可能（不）是什麼？

看起來一般物質彼此有交互作用，跟輻射也有（例如吸收、散射），然而暗物質一樣跟物質有作用（引力）但似乎不與輻射作用。觀察充斥在宇宙的微波背景(cosmic microwave background) 輻射，也顯示暗物質存在。暗物質存在的證據似乎不少，那麼暗物質是什麼東西呢？答案是：不知道！

有沒有可能暗物質也是一般重子物質呢？除了質子與中子以外，例如黑洞、中子星、年老的白矮星、棕矮星，與行星，它們不是不發光就是光度極暗。到目前為止的研究認為這些統稱為 Massive Compact Halo Objects (MACHOs) 的天體數量，並不足以成為暗物質的主要成分。

至於非重子物質的可能性，則包括了假想的一些基本粒子（例如 axion 軸子），以及統稱為 Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)，也就是有質量（引力），但不太跟別的物質作用的粒子。但是到目前都沒有實驗偵測到這種粒子存在。在名詞上，MACHO 這個縮寫先出現，是英文「男子氣概」的意思，後來的縮寫就故意稱為 WIMP，則是「膽小魯蛇」之意，展現了科學家幽默的一面。

暗物質既然數量比一般物質多，它們的引力當然對於宇宙的結構扮演重要角色。理論上依照暗物質在早期宇宙運動的快慢，與光速相比分成熱、暖與冷三種。微中子就是熱暗物質的例子，也稱為 Weakly Interacting Light Particles (WILPs)。目前觀測結果傾向支持冷暗物質，也就是天體在小尺度因為引力收縮而形成，然後彼此合併，「由小而大」建構出宇宙結構。

其他種可能

由於實務上尚未具體指認出暗物質，因此某些理論試圖不以暗物質來解釋以上提到的觀測現象。其中最著名的理論應該是 Modified Newtonian Dynamics (MOND)，試圖修改牛頓定律，最早的 MOND 由以色列物理學家 Mordehai Milgrom 於 1980 年代初期提出，假設在星系靠外圍，當加速度很小的時候，萬有引力要是不隨距離平方，而是一次方成反比，便能解釋平坦的旋轉曲線。但是後來 MOND 以及類似的理論無法完全解釋星系團的動力性質（加速度不小）或是宇宙論模型（與背景輻射的作用）等。由於 MOND 主要是修正牛頓力學，也就是以一般物質為基礎，因此當 2006 年發現兩個相撞的星系團 (Bullet Cluster) 的總物質（以重力透鏡推測）與一般物質位置有偏差時，提供了暗物質存在的有力證據。

暗物質成分為何，或甚至是否存在，目前仍是未解之謎。平常學的基本物理、化學只關於一般物質，其實只管用宇宙大千世界的百分之五。科學家沒有沮喪，面對更深廣的問題，更加振奮持續追尋答案，期待有一天能讓這些暗無天日的疑問露出一片曙光。