

尋找不可見物質

◎ 周威彥 陳方正

一 前言

在人類文明漫長的歷史之中，對地球以外天象的觀測絕大部分時間只是倚賴肉眼，因此三百多年前望遠鏡的發明和一百多年前光譜儀的發明不啻把我們帶到一個前所不能夢想到的浩瀚宇宙之中。到了近半個世紀，隨着觀測儀器的進步，以及太空觀測技術的發展，無線電波、紅外線、紫外線、X-光、宇宙線天文學逐一出現，由是又大大擴展了人類的視窗，令我們對許多前此感到迷惑的現象得到精確的理解。然而，弔詭的是，從宇宙整體結構的觀點看，所有這些一日千里的觀測進步並不表示我們已經能「看到」宇宙間絕大部分事物。恰恰相反，越來越多的證據顯示，宇宙中大部分物質是「不可見」，也就是說不會發出可探測的電磁波的。這些不可見物質簡稱為「黑質」(dark matter)，它的存在和重要性已經為天文物理學家所普遍接受了。

物理和天文都是以觀測證據為基礎的科學。那麼，不可見物質怎麼能為天文物理學家接受呢？這問題其實是生於對科學發現過程的誤解，因為在科學史上，有大量例子是新事物在發現之前就已經由於理論原因被推測存在，而其存在，則要經過長時期實驗才能證實。例如狄拉克(P.A.M. Dirac)在1929年根據他的相對性電子理論預言有正電子(positron)存在，這在1932年才得到證實；保里(Wolfgang Pauli)和費米(Enrico Fermi)在1935年通過 β -衰變分析預言有中微子(neutrino)存在，並且獲得物理學界的廣泛認同，但這個粒子要在20年之後，即1956年才真正證實存在。至於其他粒子例如 π 介子、 Ω 粒子、粲夸克、底夸克，還有今年剛剛發現的頂夸克^①等等，也都是先根據理論推斷其存在，然後才由實驗加以證實的。

在天文學史上，也有相類情況。十九世紀中葉海王星的發現是由於天王星的運行似乎不遵照萬有引力定律，從而引致推測和搜索。而繼查德威克(Sir James Chadwick)發現中子後，蘭多(Landau)即在1932年提出可能有中子星存

在的推論。巴德(W. Baade)和茲維基(F. Zwicky)在1934年就預言有中子星和超新星，但直到1967年由於脈衝星(pulsar)的發現它才得到證實。同樣，奧本海默(Robert Oppenheimer)和史奈德(H. Snyder)在1939年就已經通過嚴格計算，證明根據愛因斯坦的廣義相對論，一顆質量過大的星會坍縮成為一點，即形成後來稱為黑洞的物體。但黑洞存在的確實證據，也要到70年代初期才從雙星系統中X-光源的研究獲得。此外，根據廣義相對論，重力輻射也是老早就已認為存在的一個效應，它也一直要等到最近，從PSR 1913+16這一近距脈衝雙星系統的軌道演化研究才得到證明。

宇宙間的「黑質」問題和上述例子其實很相似。當然，這和狄拉克方程式之預言正電子，或牛頓力學之預測海王星，還不完全一樣，因為並沒有單一的系統理論，說非要有黑質不可。然而觀測上確有間接證據，甚至是相當有力的證據，令人相信這種物質瀰漫在宇宙之中。此外，理論上也有它存在的堅強理由。

以下我們就黑物質存在的推論、它的本質、探測以及最近研究的進展作一個簡單介紹。

二 宇宙的膨脹和收縮

我們認為有大量「未見」質量，主要是從研究宇宙模型所得的推論。實際的天文觀測顯示，宇宙間物質的分布在足夠大的尺度來看是均勻和各向同性的，也就是說，處處都是一樣的，這結論稱為「宇宙性原理」。根據這原理，宇宙的整體可以用一個參變量 R 來描述。 R 往往被稱為「宇宙半徑」，但更準確地說，它是宇宙中兩個物理位置，例如兩個星雲(galaxy)之間距離的尺度因子(scale factor)。

由於宇宙是均勻的，所以它是一個很簡單的系統：它相當於一個無壓力的簡單流體，唯一可觀測的物理量是物質的密度以及運動速度，而決定這些物理量變化的，則是由廣義相對論所描述的重力場。由此

宇宙模型

嚴格來說，宇宙整體演化過程可能牽涉極高密度物質的重力場，所以必須用十分複雜的廣義相對論方程計算。但奇妙的是，對一個處處均勻沒有差別的宇宙來說，無論用簡單而熟悉的牛頓力學抑或用廣義相對論來計算，所得的方程式竟然是完全相同的——只是對方程式中的各個量的解釋有所不同而已！因此，我們所熟習的牛頓力學觀念，即一個重力系統之為開放(相當於宇宙的膨脹)抑或封閉(相當於至終收縮)是取決於其總能量為正或負(亦即動能 K 大於或小於勢能的絕對值 V)，那仍然是有效的。正文中的 Ω 基本上可解釋為 V/K 。

上述的動能、勢能、總能量是指這一完全均勻(而且無限大)的宇宙之中任何一個半徑為 $R(t)$ 的圓球面之中的物質而言。由於宇宙的均勻性，球心無論選擇在那一點，結果都是一樣——而且很容易證明，圓球中離球心 r 的物質必然以相對於所選擇的球心的徑向速度 $v = H_0 r$ 運動，而 H_0 也是不變的。所謂「開放」，是指 $R(t)$ 不斷增加；「封閉」則指 $R(t)$ 增加到極大值之後又會減少至0。

計算所得的結果稱為弗里曼模型(Friedman model)，它顯示宇宙的整體演化完全決定於目前平均物質密度 ρ_0 和臨界密度 ρ_c 之間的關係。倘若 $\rho_0 < \rho_c$ ，那末宇宙是「開放的」或者永遠膨脹的，即 R 會不斷繼續增加，密度會越來越低，宇宙至終成為幾乎沒有物質的空間。倘若 $\rho_0 > \rho_c$ 則宇宙是「封閉的」，其目前的膨脹會停止，然後又再收縮，也就是說， R 增加到一個最大值之後，會又再減少，密度也會重新增加。

至於臨界密度 ρ_c 則是： $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$ ，其中 G 是萬有引力常數，而 H_0 則是所謂哈勃常數(Hubble's constant)。它來源於哈勃所發現的遠方星雲後退，而且後退速度 v 與其離我們的距離 r 成比例這一現象。 v 與 r 的比例常數就是 H_0 ： $v = H_0 r$ 。因此 H_0 是和宇宙間物質的動能有密切關係的：用牛頓力學的語言來說， $\Omega = \rho_0 / \rho_c$ 這個比例基本上就是物質勢能與動能二者的比例。粗略地說，這比例之決定宇宙是開放抑或封閉，和火箭之能否離開地球取決於它的速度是否超過地球的逃逸速度(那也和勢能有關)，基本道理是一樣的。但除了代表動能之外， H_0 還有另一個重要意義，即它大約是宇宙年齡 T 的倒數： $H_0^{-1} = T$ 。

那麼到底 ρ_c 、 ρ_0 和 Ω 是多少呢？ ρ_c 和 H_0 有關，而後者由於測度遠方星雲的實際距離十分困難，所以只能說大約是在 50 至 100 km/s/Mpc 之間，若採用目前通用數值 75 km/s/Mpc，特別是有鑒於近期對室女座星團距離的研究成果(這大約相當於 $T = 134$ 億年)，那麼 $\rho_c \sim 1.1 \times 10^{-29}$ g/c.c.。

至於 ρ_0 的估計就比較困難了。假如我們把所有通過無線電、光學、X-光、

伽瑪射線……等一切觀測窗口所「見到」的物體，例如恆星、星雲、星際雲氣等等，還有其他已探測到的能量形式(例如磁場)都包括在內，那末得到的結果是 $\rho_0 \sim 0.1 \rho_c$ ，即 $\Omega = 0.1$ 。而最近紅內線天文衛星探測的結果更將 Ω 提高到 0.5②。

像 ρ_0 和 ρ_c 這樣兩個由完全不同的天文觀測途徑得來的實測數字居然會相互符合到差不多同一數量級之內，那是極之驚人的。也因此有很強的理由相信 Ω 的準確值其實正就是 1。這主要因為只有 $\Omega = 1$ 才是一個穩定不變的值，所有其他的 Ω 值都會隨宇宙年齡 T 變化，而且變化很大。例如 Ω 目前若真是等於 0.1

天文尺度

天文學上要經常處理極為遙遠而且數量級變化很大的距離，測量這距離最基本的單位是千米(km)，但此外還有下列其他常用單位：

天文單位(A.U.)是太陽和地球間的平均距離，這已準確測定為 1.496×10^8 km。

光年(l.y.)是光在一年所行經的距離，或 0.95×10^{13} km。

秒差距(parsec, pc)是從遠處觀測地球和太陽二者所張弧度恰為 1 秒時的距離。 $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ l.y.} = 3.086 \times 10^{13}$ km。最近的星雲離地球大約幾個秒差距。

千秒差距(kiloparsec, kpc) $1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc}$ 。
兆秒差距(Megaparsec, Mpc) $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{19}$ km。

星雲的半徑大約是在數十 kpc 的數量級。

的話，那麼在宇宙演化開始之後1秒鐘時 Ω 便必須有一個準確到 10^{15} 分之一的特殊值③。但「目前」這一刻並沒有甚麼特殊之處（這是所謂時間上的哥白尼原理），那麼為甚麼 Ω 的起始值恰恰會使得目前的 Ω 那麼接近1呢？因此，只有實際上 $\Omega=1$ 才是真正合理的解釋。

此外，在愛因斯坦的廣義相對論中，倘若宇宙常數 $\Lambda=0$ ，並在膨脹模型 (inflationary model) 的範圍內，那麼自然就會導致 $\Omega=1$ 。宇宙常數所代表的，是與萬有引力對抗的萬有斥力（即是隨着質點間距離而增加的相斥力），它的值到底應該是甚麼，現在還不能由基本理論確定。但所有觀測數據都顯示 Λ 極小，因此，它根本為0也是很自然的。

星系結構

在極大尺度（例如數百Mpc）宇宙是均勻的，但在較小尺度（例如pc尺度）它卻是高度非均勻的，而且有多個密度等級，這主要是由恆星和瀰漫物質在重力吸引下形成大小不同的結構所致。其中最普通的是球狀星團 (globular cluster)，它一般包含 10^5 至 10^6 顆星，半徑約50pc。星雲 (galaxy) 是較大的系統，包含 10^{10} 至 10^{12} 顆星，可見半徑大約50kpc。星雲又可以分為橢圓、螺旋、不規則等形態。我們的銀河系是典型的螺旋星雲，M87是巨型橢圓星雲，而大麥哲倫雲氣則屬不規則型。在更大的尺度，多個星雲還可以互相吸引，組成星雲團 (galactic clusters)，它的半徑達到Mpc的數量級，所包含的星雲可以有幾百個以上。例如離銀河系19Mpc的室女座星雲團 (Virgo clusters) 直徑是4Mpc，星雲數目達到2,500個。

三 黑質的實測蹤跡

倘若 $\rho_0 = \rho_c$ ，但可直接觀測的物質密度只有 $0.1\rho_c$ 或 $0.5\rho_c$ ，那麼宇宙間必然有大量不可能直接觀測的所謂「黑質」存在。黑質雖然不發光，但它具有質量亦即能量，因此必然具有重力效應，從這重力效應就可以推出它存在的證據來。這些證據相當堅強，但還不能算完全確定，因為還不能完全排除某些特殊的其他解釋。

在70、80年代之交，我們得到了兩種黑質存在的有力實測證據。第一種證據是從螺旋星雲旋臂運動的研究，特別是魯賓 (V. Rubin) 的工作④得來的。這研究顯示，倘若星雲中的所有物質只限於可見物質的話，那麼星雲旋臂曲線便不可解。第二種證據是俄國有關氫元素的 β -衰變研究⑤，它表明電子中微子（它們只有弱作用，故此極難探測，實際上等於是不可見的黑質）的靜止質量可能並不是0，而是20-40電子伏。這雖然是極小的質量（還不及電子的萬分之一），但根據標準「大爆炸」模型，在宇宙生成之初會產生大量原始中微子，所

以這微小的質量就足以改變宇宙的整體質量，令 $\Omega=1$ 。以下我們就來詳細說明這兩類證據。

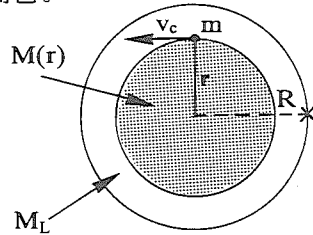
甲 星雲旋臂曲線

根據牛頓力學，螺旋星雲中恆星對星雲中心的繞行速度 v_c 和在距離中心 r 以內的星雲質量 $M(r)$ 有一個簡單關係： $M(r)=rv_c^2/G$ 。假如星雲中所有質量都

運轉速度和質量關係

可以從牛頓力學嚴格證明，在(各向同性)質量球之中以速度 v_c 運轉的質點 m 只受在其徑距 r 以內的質量 $M(r)$ 吸引(至於在 r 以外的質量 M_L 則完全不生作用)，而且吸引力則相等於集中在球心同樣質量所生的萬有引力，即 $F = GM(r)m/r^2$ 。這力必須與質點的向心加速度 $a = v_c^2/r$ 取得平衡。因此，將前兩式代入 $F = ma$ 並化簡即得正文中的 $M(r) = rv_c^2/G$ 。

由於星雲的質量集中在核心，而核心呈球狀，甚至其附近的黑質亦一般假定為球狀分布，所以上述推論和方程式是有效的。但在核心以外星雲一般呈碟狀，由此而產生的引力場屬扁球(oblate spheroid)類型，只是近似符合上面的方程式而已。



在星雲球狀核心以內距離 r 處以速度 v_c 作圓周運動的質點 m 。

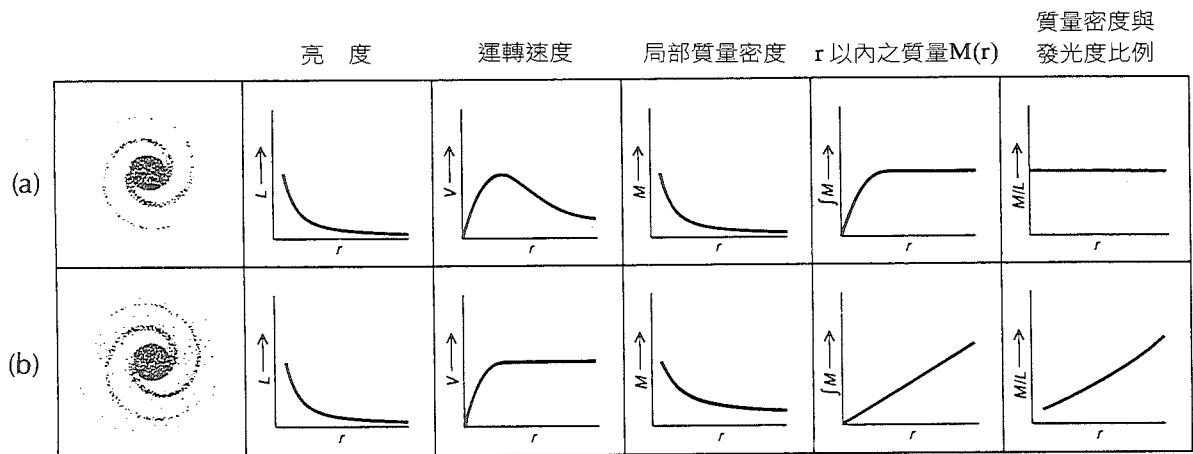
集中在半徑為 R 的核心之內，那麼，根據上式，在 $r > R$ 時 v_c^2 便會與 r 成反比。另一方面，倘若質量分布很廣，譬如說 $M(r)$ 與 r 成比例(星雲是大體均勻的質量碟，在碟半徑 R 大於 r 時就會這樣)，那麼 v_c^2 的曲線就會拉平，而不會隨距離遞減。無論如何， rv_c^2/G 可以從動力觀點提供一個 $M(r)$ 的估計。

我們可以利用可見光和射電頻譜的多普勒效應，來測定離螺旋星雲中心不同距離的物體(它們都在旋臂之中)的繞行速度。至於在離星雲中心較近(大約30千秒差以內)，也就是溫度較高的區域，則可以利用一些高溫星周圍氫和氦氣雲的發射譜線作為測定對象；至於離中心較遠(可以遠到10兆秒差)的部分，則可以中性氫原子(HI)的21厘米無線電波為測定對象。

另一方面， $M(r)$ 則可以從直接攝影觀測加以估計。這主要是

先測量亮度曲線 $L(r)$ ，然後從亮度與發光質量 $M_L(r)$ 這一比值，即 M_L/L 的理論模型反求發光質量的曲線。

至今為止，已經測定了大量螺旋星雲的動態和光度質量數據⑥⑦了，結果是幾乎所有遠距比較都證明 $M(r)$ 要比 $M_L(r)$ 大得多(圖1)。——一般是：在100千秒差的距離， $M(r) \sim 10M_L(r)$ 。換而言之，這些星雲的遠距繞行速度曲線都十分平直，因此我們有理由相信，可見的星雲其實是被一團巨大、不可見的黑質所包圍的，所以它的真正質量 $M(r)$ 遠大於發光質量 $M_L(r)$ 。



據V.C. Rubin, *Scientific American* (June 1983), p. 88ff.

圖1 (a)倘若星雲之發光質量為全部質量時的情況。(b)倘若星雲被一團巨型黑質包圍時的情況。實際測得數據與情況(b)相符。

乙 恆星速度分布和X-光證據

除了螺旋星雲以外，在其他恆星體系例如球狀星團、矮星團、橢圓星雲（最著名的是M87）之中，個別恆星的運動往往有如氣體分子，是隨機的。在這種情況下，根據力學中著名的維里定理，恆星動能和勢能的平均值有簡單關係，因此從恆星速度平方的均值，就可以推斷出勢能，也就是整個體系的質量。所得結果，顯示發光質量遠低於勢能質量，也就是有大量黑質存在。

此外，還有不少星雲發射X-光(M87又是例子)，這主要是由星雲中的雲氣所致。假設雲氣是與局部重力勢場成壓力平衡的理想氣體，並且根據X-光頻譜與溫度的合理關係，也可以估計整個星雲的質量。而所得結果再次顯示這些星雲是被十倍於可見部分的黑質所圍繞的。

丙 重力透鏡效應

在廣義相對論的架構中，光線循着重力場的所謂零短程線進行，也就是說，會受大塊質量吸引而彎曲。這就為黑質的探測提供又一種新途徑。例如遠方類星體的發射就往往有重力透鏡效應，而且其強度顯示居間的星雲很可能是被黑質包圍的。除了星雲之外，單顆恆星在移到遠方物體前面的時候，也可以令後者的影像散裂，產生所謂微透鏡效應。最近對所謂大麥哲倫雲氣(Large Magellanic Clouds)和銀河凸包(Galactic Bulge)之中恆星的觀測似乎也顯示在銀河系之中就有黑質的存在。

除了以上四項主要效應之外，還有不少其他個別有關重力系統的研究結果，是只有用黑質才能圓滿解釋的。這包括星雲質碟中恆星速度和分布的研

究，多個球狀星團在相互起潮力影響下的穩定性，以及不同星雲的相對運動狀況等等。由這些研究所得有關黑質存在的證據有些（特別是關於螺旋星雲的）是難以置疑的，其他的（關於橢圓星雲和星團的）也非常之堅強。事實上，有證據（但這裏就不再討論）顯示，即使在星雲集團之中，甚至在不同集團之間，也都有黑質存在。換而言之，黑質是在宇宙間所有不同尺度系統之中存在的。

四 黑質是甚麼？

黑質存在的觀測證據雖然很強，但它的本質卻至今還不能弄清楚。在這方面我們要面對的第一個問題是黑質到底是否屬重子(baryon)，或者粗略地說，它是否由我們熟悉的質子和中子構成？答案是：不可能。因為在標準弗里曼模型中，根據輕元素（例如重氫 ^2H 、氦 ^3He 、鋰 ^7Li 等）的豐量以及哈勃常數 H_0 就可以得到重子密度 ρ_B 的上限，而結果是 $\rho_B \leq 0.07 \rho_c$ 。這也就是說，重子密度不可能超過已知的可見質量密度，所以無法用以解釋黑質——甚至像Coma星雲集團那樣的情況($\Omega \sim 0.25$)也是解釋不來的。

因此，我們必須向非重子尋求失落的宇宙物質。一個常常提到的可能性是所謂WIMPS，即是穩定的弱作用重粒子(weakly interacting massive (stable elementary) particles)。粒子物理學的標準模型中有不少這類假設性的粒子，例如重中微子、中性子(neutralino)、軸子(axion)◎等等。這些粒子只有中微

穩定弱作用重粒子WIMPS

中微子(neutrino)是在 β -衰變中產生，而唯一已證實存在的WIMPS(其實它有三個不同類別)。根據 β -衰變的能譜來看，中微子的靜止質量似乎是0，但並不能排除它有極微小(例如幾十eV)的靜止質量。在目前，這是主要問題。

中性子(neutralino)和軸子(axion)都是所謂超對稱粒子理論架構中可能存在的新奇粒子。前者能量可能超過20Gev而且極之穩定，至於後者能量極小(小於 10^{-3} eV)，但在宇宙之初可能極大量產生。

子是已經證實存在的，但它是否有靜止質量卻還不能夠肯定。至於其他的WIMPS，則還是實驗室裏面的找尋目標◎，這一般是利用它們和原子核發生反應(由於這是弱作用，所以機率極低)時所產生的電離、能量釋放或者(在超導系統中)所引起的電流：至於軸子則應當在通過強磁場(約0.2兆高斯)發出微波。至今為止，這些找尋WIMPS的實驗都還未有結果。

另一方面，重子黑質卻很容易辨認，而且可能是星雲暈的主要成分。它可以多種不同形式出現，例如褐矮星、木星型的行星，以及星的塌縮殘餘，例如白矮星、中子星、黑洞等等。這些所謂MACHO'S，即大質量和高密度的星雲暈物體(massive compact galactic halo objects)可能早已通過它們對遠方場星(特別是在大麥哲倫雲氣和銀河凸包之中)⑩的微重力透鏡效應而觀測到了。

五 最新進展

曾經有人宣稱：「黑質問題是天文學和宇宙學中第一重要的問題」^①。道理很簡單：它關乎整個宇宙的基本構成以及未來命運。亦正因為其如此，所以這一問題牽涉廣泛，舉凡基本理論、基本粒子實驗和種種天文觀測，都莫不涉及，因此，它的解決恐怕並非一朝一夕的事，須要科學家的長久協同努力方才有希望。

在目前，這一問題的研究已有種種迥然不同的方向。例如，黑質存在的種種重力證據都牽涉牛頓力學（也就是廣義相對論的弱場極限理論），但牛頓力學其實並未曾在超過0.1秒差的尺度（大致上是太陽系彗星群所及的範圍）受嚴格證驗。因此就曾有各種修改重力理論的建議（例如米格林(Milgram)的建議^②），這可以說是「取消」黑質問題的做法。但這些修改雖然可以相當完滿地解釋種種黑質存在的動力證據，它們畢竟並非完整，可以取代廣義相對論的重力理論，因此只能算是臨時的、枝節的修補工作，除非有進一步的大發展，否則是不會被接受的。

另一方面，找尋WIMPS和MACHO's的努力卻也並非完全白費。最近洛斯阿拉姆斯(Los Alamos)國家實驗室的大規模液閃爍中微子探測器錄得了8樁可以解釋為中微子振盪的事例^③。具體地說， μ 反中微子經過30米飛行途徑之後可能變成為電子反中微子。這一結果倘若獲得證實，那麼二者之間的質量差就隱含中微子有相當大的靜止質量。也就是說，它可能是重要的黑質成分。倘若果然這樣，那麼西安那(Sciama)認為^④，重中微子有可能緩慢地衰變為輻射：幾十電子伏的中微子就會產生有電離作用的紫外輻射，而這對解釋，例如說，銀河系內星際雲氣的電離，是很有關係的。以目前已有的觀測數據而言，中微子的質量 m_μ 大致在 29.4 ± 0.4 電子伏左右，而半衰期則不能短於 2×10^{23} 秒（約相當於 6×10^{15} 年），即宇宙年齡的百萬倍左右。

在前面我們已經提過在1993年秋季觀測到MACHO'S的可能性了。這些都是和星的微型重力透鏡效應有關的，一共有8個事例。而最近又增加了15個在銀河系以內的事例。但這些事例並不太確定，不能排除它們根本是發光星體所造成的效應。所以，今後還須繼續用電腦進行大規模的自動搜索，以尋找更確切的，無可置疑的證據。

最後，加州柏克萊大學校園的物理學家還想到利用新技術（主要是原子力顯微鏡）在數百萬年的古老雲母片之中找尋WIMPS的穿透軌跡，這些軌跡的數目是和某一類別的WIMP的質量以及大小相關的^⑤。他們迄今所得的初步結果已經和最好的反應探測器所得的極限不相上下了。

總的來說，黑質問題至今還是千頭萬緒，難以看出至終解決的方向和時刻何在。對這樣一個龐大而又基本的問題，這是不足怪的。而且，我們回顧天文學和物理學發展的歷史，像這樣令人茫然無所適從的情況也多了。但在我們

努力不懈的追尋之下，大自然往往會以最意想不到的方式揭起隱蔽它奧秘的帷幕，使我們跨進一個新境界：上世紀末的以太(ether)問題是這樣，本世紀初的太陽能源之謎是這樣，宇宙膨脹以及大爆炸背景輻射的發現也是這樣。相信日後黑質之謎終也有完整、無疑問地完全解決的時候——但何時和怎樣解決，在目前卻完全無法想像。這可以說是走在科學和宇宙探索歷程上必然不會感到沉悶和失望的原因吧。

參考文獻

- ① 見《二十一世紀》24, 50 (1994)的介紹。
- ② J.R. Primack, D. Seckel and B. Sadovlet, *Ann Review of Nuclear and Particle Science* 38, 751 (1988).
- ③ J. Gribbin: *The Omega Point* (Bantain Books, 1988).
- ④ V.C. Rubin, *Scientific American* (June, 1993), p. 88.
- ⑤ V.A. Lyubimov et al, *Physics Letters* 94B, 266 (1980).
- ⑥ S.M. Kent, *Astronomical Journal* 93, 816 (1987).
- ⑦ K.M. Ashman, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 104, 1109 (1992).
- ⑧ S. Tremaine, *Physics Today* 28 (February 1992).
- ⑨ M. Bartvsiak, *Mercury* (November–December 1993), Book-Excerpt.
- ⑩ As reported by J. Wambsgauss, *Nature* 370, 248 (1994).
- ⑪ D.W. Sciama: *Modern Cosmology and the Dark Matter Problem* (New York: Cambridge University Press, 1994).
- ⑫ As reported by M. Mukerjee, *Scientific American* (August 1994), p. 22.
- ⑬ As reported by C.J. Hogan, *Science* 265 (1994), p. 817.
- ⑭ As reported by J. Travis, *Science* 265 (1994), p. 607.

周威彥 1967年獲哥倫比亞大學物理學博士學位。曾任香港理工學院應用物理系系主任、香港大學物理系講座教授兼系主任及香港中文大學榮譽教授。現為加拿大皇后大學物理系教授。

陳方正 原任教香港中文大學物理學系，現任中國文化研究所所長。