

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

第一名

040509

星系團照妖鏡

臺北市立第一女子高級中學

作者姓名：

高二 陳欣榆

指導老師：

蕭志明

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：地球科學科

組 別：高中組

作品名稱：星系團照妖鏡

關鍵詞：星系團、宇宙微波背景輻射、宇宙學

編 號：

目 錄

| | |
|---------------------------|----|
| 摘要 | 1 |
| 壹、研究動機 | 1 |
| 貳、研究目的 | 1 |
| 參、研究設備及器材 | 2 |
| 肆、研究過程和方法 | 2 |
| 一、研究原理 | 2 |
| 二、研究方法及步驟 | 3 |
| 伍、研究結果 | 6 |
| 一、與星系團中心距離和 S-Z 強度的關係 | 14 |
| 二、與星系團中心距離和質量密度的關係 | 16 |
| 三、星系團總質量與其中心 S-Z 強度的關係 | 18 |
| 四、星系團總質量與總 ΔT 的關係 | 19 |
| 陸、討論 | 20 |
| 柒、結論 | 21 |
| 捌、參考資料 | 22 |

星系團照妖鏡

摘要

我們藉由電腦多體模擬的手段，透過對宇宙微波背景輻射中之 Sunyaev-Zel'dovich 效應（簡稱 S-Z 效應）的研究，來探討星系團的一些根本性質，以便應用在觀測上。重要的發現有：

- 一、星系團的 S-Z 效應之強度（即所造成之背景輻射的溫度變化） $\Delta T = a \left[1 + (r/b)^2 \right]^c$ ，其中 r 為至星系團中心的距離， a 、 b 、 c 均為常數，且 $c = -1.0 \pm 0.22$ 。
- 二、星系團的質量密度 $= a \left[1 + (r/b)^2 \right]^c$ ，且 $c = -0.71 \pm 0.087$ 。
- 三、星系團總質量 M （單位為太陽質量）與其中心 S-Z 強度 ΔT （單位為 K）的關係為： $M = 10^{18.2 \pm 0.360} \times T^{1.00 \pm 0.081}$ 。
- 四、星系團總質量 M 與其總積分 ΔT (ΔT_{total}) 的關係為： $M = 10^{-12.42 \pm 2.035} \times \Delta T_{total}^{0.593 \pm 0.046}$ 。
- 五、以後將可根據以上的四和五，推算出所觀測到之 S-Z 星系團的質量。

我們的研究成果，將可在短期的未來，直接應用在許多期待中的觀測結果上，以揭開星系團的神祕面紗。

壹、研究動機

在國中及高中的課本，以及多次的觀星經驗中，感覺**星系團**（龍騰版基礎地球科學課本第十章第二節）一直帶著神祕的色彩，它們既龐大又遙遠。後來在展望系列演講以及科學人雜誌中得知，我們可以利用高中所學的**宇宙微波背景輻射**（龍騰版基礎地球科學課本第十章第二節）以及**康普頓散射效應**（南一版高中物理下冊第二十三章第五節），來進一步探究星系團的本質，因此引起我強烈的興趣，決定作進一步的深入研究。

貳、研究目的

宇宙微波背景輻射來自大霹靂後約 40 萬年，它是宇宙因為降溫而被釋放出來的光子（龍騰版基礎地球科學課本第十章第二節），這些光子在到達地球前的約 140 億年間，如果有經過高溫的星系團核心（龍騰版基礎地球科學課本第十章第二節），則會藉由康普頓散射（南一版高中物理下冊第二十三章第五節）吸收高溫游離電子的能量，而使其能量隨頻率的分布，偏離原本符合黑體輻射定律的普朗克分布（南一版高中物理下冊第二十三章第三節），這個現象叫做 **Sunyaev-Zel'dovich 效應**（簡稱 S-Z 效應）。本研究的目的，是要藉由電腦模擬的手段，來探討 S-Z 效應和星系團本質之間的關係，並期望能將這些結論運用在實際的觀測上，以揭開星系團的神祕面紗。S-Z 效應的探測，目前是世界上宇宙學領域中最熱門的競爭之一，所以我們的研究成果，將可在短期的未來，直接應用在這些期待中的觀測結果上。

參、研究設備及器材

- 一、軟體：Hydra 軟體、C 語言程式、Fortran 語言程式、Matlab 分析軟體
- 二、硬體：Sun Blade 2000 電腦工作站、Pentium 個人電腦

肆、研究過程和方法

一、 研究原理：

本研究主要是利用宇宙微波背景輻射和星系團作用後所產生的S-Z效應，來探討星系團的本質。所謂的S-Z效應，就是宇宙微波光子在通過星系團中的高溫電子之後，因平均溫度升高而偏離普朗克分布曲線之現象。星系團的局部溫度越高，所造成的S-Z效應就越強，因此偏離普朗克分布的程度就越大。定量而言，如果宇宙微波光子原本的溫度隨頻率之分布為 $T_0(\nu)$ （如圖一之黑色曲線，其中 ν 為光子頻率、 T_0 為無S-Z效應之溫度），經過S-Z效應後之溫度為 $T_0(\nu) + \Delta T(\nu)$ （如圖一之紅色曲線），則S-Z效應所造成的溫度變化量可定義為（Runyan et al., 2003; Silva et al., 2000）：

$$\frac{\Delta T}{T_0}(\nu) = g(x)y \quad (\text{公式 1})$$

其中

$$x = \frac{h\nu}{kT}, \quad g(x) = \left(x \frac{e^x + 1}{e^x - 1} - 4\right), \quad y = \frac{k\sigma_T}{m_e c^2} \int n_e T_e dl \quad (\text{公式 2})$$

k ：波茲曼常數 $\approx 1.38 \times 10^{-16}$ erg/K

h ：卜朗克常數

T ：宇宙微波背景輻射的溫度

y ：Compton-y parameter，正比於光子和電子發生散射的機率

σ_T ：Thomson cross section $\approx 6.65 \times 10^{-25}$ cm^2

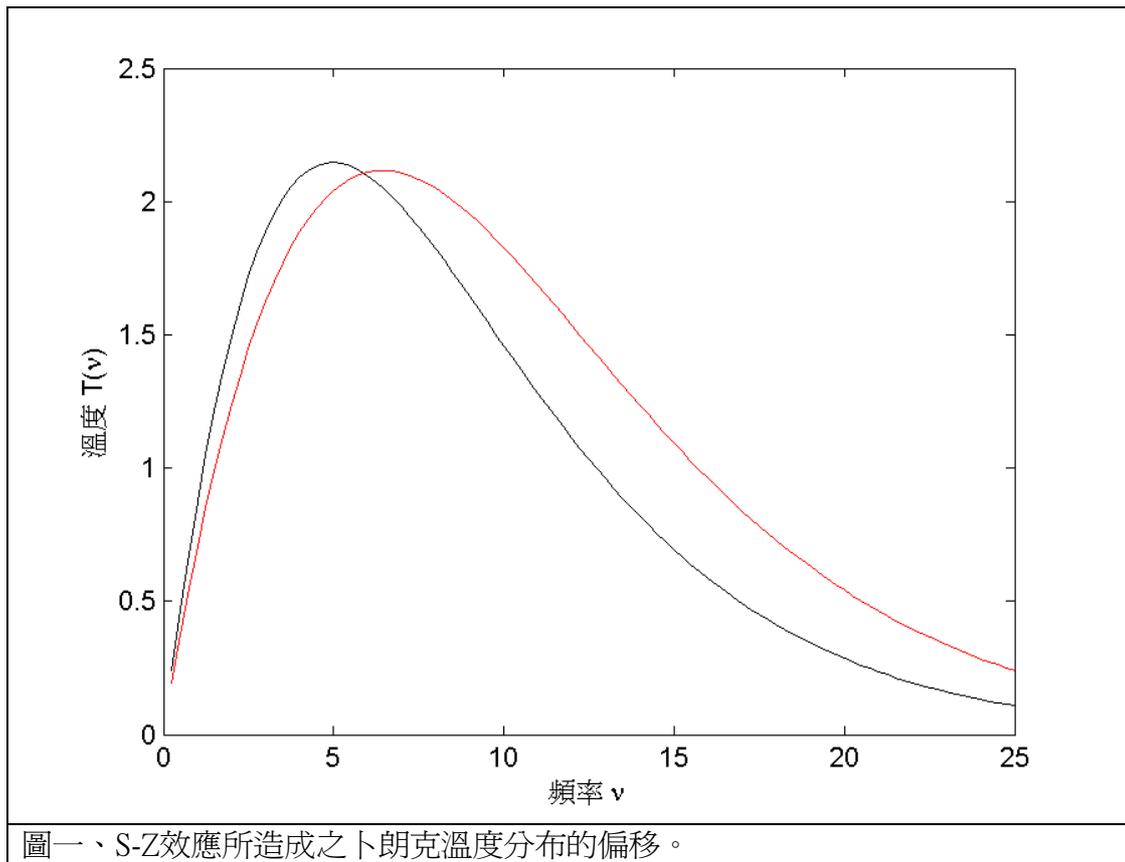
c ：光速

m_e ：電子質量 $\approx 9.1 \times 10^{-31}$ kg

n_e ：電子個數密度

T_e ：電子溫度

利用電腦模擬，我們將可以找出S-Z效應強度（即上述之溫度偏移量）和星系團本質之間的關聯性，以便將來運用在觀測上。



二、 研究方法及步驟：

我們的研究方法，基本上是先利用Hydra軟體模擬出數個小宇宙，裡面各形成了數個星系團，接著再利用自己所撰寫的程式，計算出宇宙微波光子在通過這些星系團時，所產生的S-Z效應強度。接著針對這些S-Z效應的強度及分布，來探討和星系團的質量、溫度分等之間的關係。

Hydra 軟體是專業天文物理界中所普遍使用的電腦程式。它主要是透過多體運動的計算，來模擬宇宙結構的形成。目前學術界利用 Hydra 所做出來的研究論文不下百篇，例如有近幾年來的 R.E. Smith et al., 2003; Silva et al., 2000; T.Theuns et al., 1998; A. Jenkins et al., 1998; P.A.Thomas et al., 1998; Barber A. J.,2002; Barber A. J.,2003 等等。本軟體允許使用者改變各種宇宙參數，模擬出一個充滿質點的宇宙箱子，讓它隨著時間依質點間的萬有引力作用而演化。在我們的電腦模擬中，所使用的初始條件是目前宇宙學界所普遍接受的數值，也就是同時具有黑暗能量和黑暗物質，其中黑暗能量（也就是 Λ ，又稱宇宙常數）占宇宙總能量的 73%，黑暗物質（簡記作 DM）占宇宙總能量的 22.5%，一般物質（即重子）占宇宙總能量的 4.5%。黑暗能量提供萬有斥力，黑暗物質提供重力，此二者皆與光子沒有任何交互作用；代表一般物質的每一顆粒子可看成是一小團具有球對稱性的雲氣（簡稱雲氣球），具有重力和氣體壓力的作用。質點的總數為 2×64^3 個（一般物質共 64^3 個，黑暗物質共 64^3 個），初始時間的紅位移值 $z=19$ ，哈伯常數= $71 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$ （ $1\text{Mpc} = 3.26 \times 10^3$ 光年），光子頻率 $\nu = 100\text{GHz}$ （此數值接近台灣 AMIBA 計畫的觀測頻率）。我們總共將模擬四個小宇宙：

- (一) 第一個宇宙：邊長 $70h^{-1}Mpc$ ，每個一般物質質量 $2.29 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ ，每個黑暗物質質量 $1.145 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ 。其中 $M_{\text{sun}} = 2 \times 10^{33} g$ ，為太陽質量。
- (二) 第二個宇宙：邊長 $35h^{-1}Mpc$ ，每個一般物質質量 $2.862 \times 10^9 M_{\text{sun}}$ ，每個黑暗物質質量 $1.4325 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ 。
- (三) 第三個宇宙：邊長 $35h^{-1}Mpc$ ，每個一般物質質量 $2.862 \times 10^9 M_{\text{sun}}$ ，每個黑暗物質質量 $1.4325 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ 。
- (四) 第四個宇宙：邊長 $140h^{-1}Mpc$ ，每個一般物質質量 $2.29 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ ，每個黑暗物質質量 $1.145 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ 。

在每一次的電腦模擬中，我們讓程式執行 2000 個時間步 (time step)，每 50 步紀錄一次，紀錄中包含每個質點 (包括了一般物質和黑暗物質) 的質量、溫度、位置、速度和雲氣球半徑。我們可以用 Hydra 的附屬程式 tipsy 來畫出指定時期的質點分布狀況，以作為必要時的參考。

接著，我們利用自行撰寫的 C 程式(如附件)，來計算出星系團的 S-Z 效應。以下為這個程式的執行步驟：

- (一) 我們使用極高的解析度 (一般約為 128^3 或 256^3) 來計算 S-Z 效應。我們將前三個模擬的箱子切割成 1024^3 個正立方小盒子、最後一個箱子分成 2048^3 個(因為其質量較大，需要較高的解析度)。接著讀入 Hydra 的執行結果，求出每一個小盒子中心到雲氣球中心 (即 Hydra 模擬中的質點) 的距離：

$$x = |\bar{r} - \bar{r}_i|/h_i \quad (\text{公式 3})$$

其中 \bar{r} 為小盒子中心的座標， \bar{r}_i 為雲氣球中心的座標 (即質點的位置)， h_i 為和雲氣球半徑的一半(即 smoothing length，以大箱子的邊長為單位)。

- (二) 在雲氣球內，至球心距離 xh_i 上的單位體積內之質量為 $m_{\text{gas}} \times W$ ，其中 W 函數描述雲氣球內質量的分佈，即：

$$W(x, h_i) = \frac{1}{4\pi h_i^3} \begin{cases} 4 - 6x^2 + 3x^3, 0 \leq x \leq 1 \\ (2-x)^3, 1 < x \leq 2 \\ 0, x > 2 \end{cases} \quad (\text{公式 4})$$

- (三) 計算 (公式 2) 中的電子密度(Silva et al., 2000):

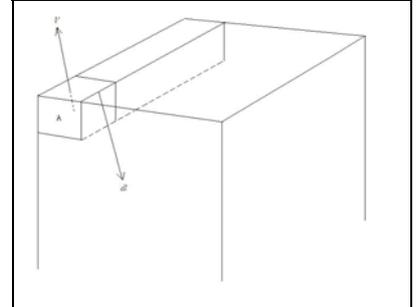
$$n_e = (\text{重子密度}) \times (\text{每個重子有幾個電子}) \\ = \left(\frac{m_{\text{gas}} \times W}{m_p + 0.88m_e} \right) \times 0.88 \approx \left(\frac{m_{\text{gas}} \times W}{m_p} \right) \times 0.88 \quad (\text{公式 5})$$

在這裡重子是指質子和中子，根據理論計算，在早期的宇宙中，當質子中子形成氫原子及氦原子的時候，其質子和中子的質量比值約為 7:1，若當時的宇宙為電中性，則每個質子應該就要有一個相對應的電子，也就是說平均每個重子可以分到 7/8 個電子，大約是 0.875，也就是這裡的 0.88。這裡假設當溫度夠高時電子會全部由氫原子中被游離出來。

- (四) 接著可以把 V 當作小盒子的體積， A 當作小盒子的截面積，則 $dt = \frac{V}{A}$ (見圖二)。因此

$$y = \frac{k\sigma_T}{m_e c^2} \int n_e T_e dl \Rightarrow y = \frac{k\sigma_T}{m_e c^2} \frac{V}{A} \sum_{\alpha} \sum_i T \left(\frac{m_{gas} \times W}{m_p} \times 0.88 \right) \quad (\text{公式 6})$$

這裡的 \sum_i 是把對於一個小盒子中心有貢獻的粒子之效應全部加起來；因為我們沿某方向所觀測到的宇宙微波背景輻射，為三維空間中的 S-Z 效應疊加到二維空間中的結果(成為平面疊加圖)，因此， \sum_{α} 是沿著視線的方向把所有小盒子上的 S-Z 效應疊加起來。我們將雲氣球(每個雲氣球大小不同)沿每個半徑方向都取 400 個等距的點，將這些點代入(公式 4)並乘以體積而得到質量(因點和點之間皆不連續，故可視為佔有一定體積)後，沿視線方向相加，再將其換算成 1024^3 的解析度的小盒子應佔有的質量，即可代入(公式 6)求出 y (即 Compton-y parameter)。



圖二、 V 為小盒子的體積， A 為小盒子的面積

(五) 將所得到的 y 值帶入 (公式 1)，最後可求出 S-Z 效應的溫度變化量 ΔT 。

本程式所使用的單位皆為 CGS 制。Hydra 輸出的粒子座標皆以箱子的長度為單位(輸出的皆為 comoving coordinate 的長度)，所以都在 [0,1] 之間。Hydra 在作計算的時候，也是使用同樣的數值，但是在計算真正的物理量的時候要乘上箱子的長度才是真正 comoving coordinate 的長度，然後再乘上 scale factor $a(t)$ 才會把 comoving coordinate 的長度轉換成真正的 physical coordinate 的長度。除了座標以外，Hydra 輸出的其他物理量都是用真正 comoving coordinate 的長度，所以不必再乘上箱子的長度。因此箱子的長度為： $\frac{box100}{h100} Mpc$ 。

最後利用 Matlab 程式將自己撰寫之程式所輸出的溫度變化 ΔT 畫成圖形，並作以下之分析：

- (一) 比較一個星系團在不同形成階段的差異。
- (二) 比較與星系團中心距離 r 和 S-Z 強度間的關係。撰寫 Fortran 的程式求出星系團的中心位置，以此中心向外畫出不同半徑的同心圓，求出各個同心圓圓周上(即為各個

與星系團中心不同距離 r 之 ΔT 的平均值；接著使用 $\Delta T = a \left[1 + \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right]^c$ (Jones, C. et al.,

1984) 的數學模型讓 Matlab 去找出它的 a 、 b 、 c ， a 代表了距離 r 逼近 0 的時候之 ΔT / 中心溫度(應為 1)， b 為斜率由極大轉入平緩的臨界值， c 為影響曲線走向(衰退)的指數。

- (三) 比較與星系團中心距離 r 和質量密度的關係。用類似 (2) 的方法求出各個半徑同心圓的質量密度平均值，再用質量密度 $= a \left[1 + \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right]^c$ 的模型去找出 a 、 b 、 c ，其中

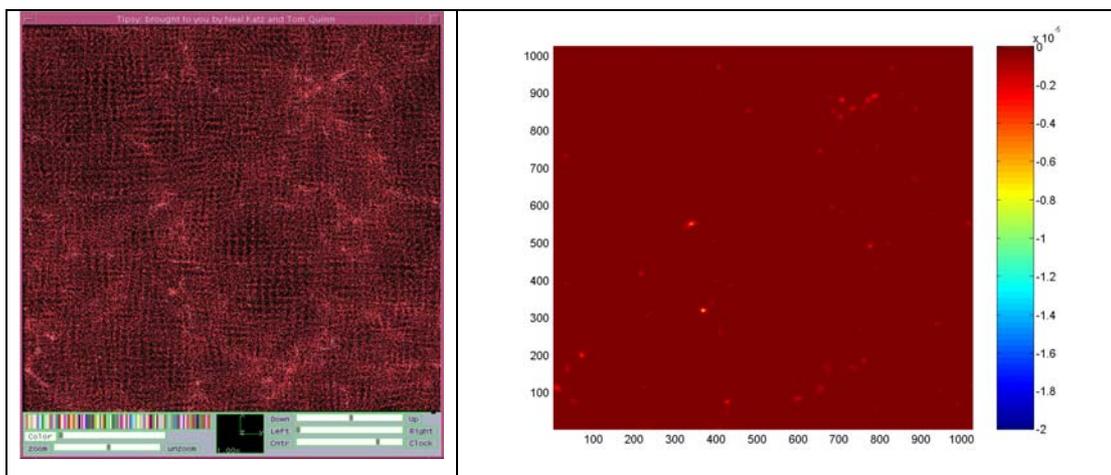
a 代表了距離 r 逼近 0 的時候之質量密度 / 中心質量密度(應為 1)。

- (四) 比較星系團總質量與其中心 S-Z 強度的關係。
- (五) 比較星系團總質量與總 ΔT 的關係。

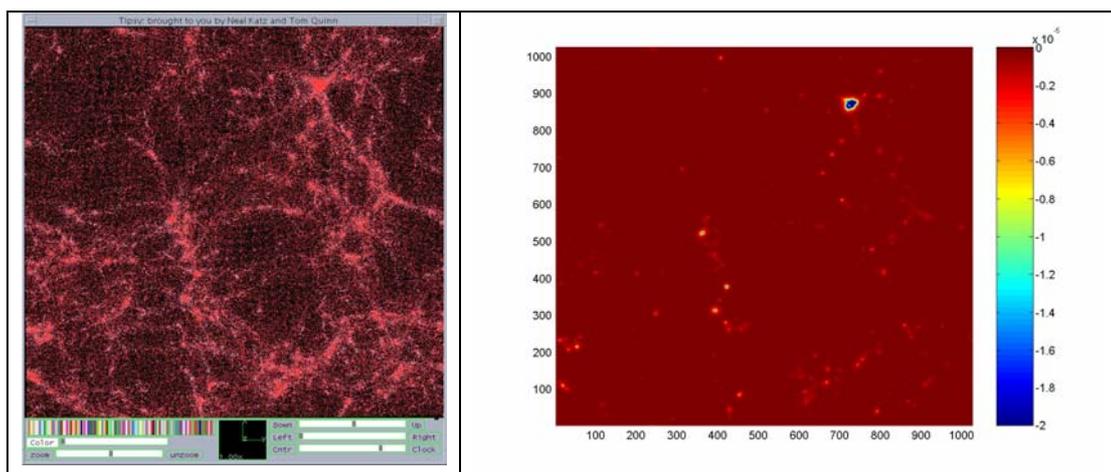
伍、研究結果

以下為我們所模擬出的四個宇宙之結果，因為在所考慮的光子頻率上(100GHz)之 ΔT 為負值，所以 ΔT 越小（ ΔT 絕對值越大），代表溫度越低，S-Z 強度越強。在這裡時間是以紅移 z (red shift) 來定義。因為星系團的中心部份常有極高溫的數個質點，為了在圖中看清楚其他較低溫區之溫度梯度變化，我們透過 Matlab 選取了溫度的著色範圍。四個模擬宇宙之結果如下：

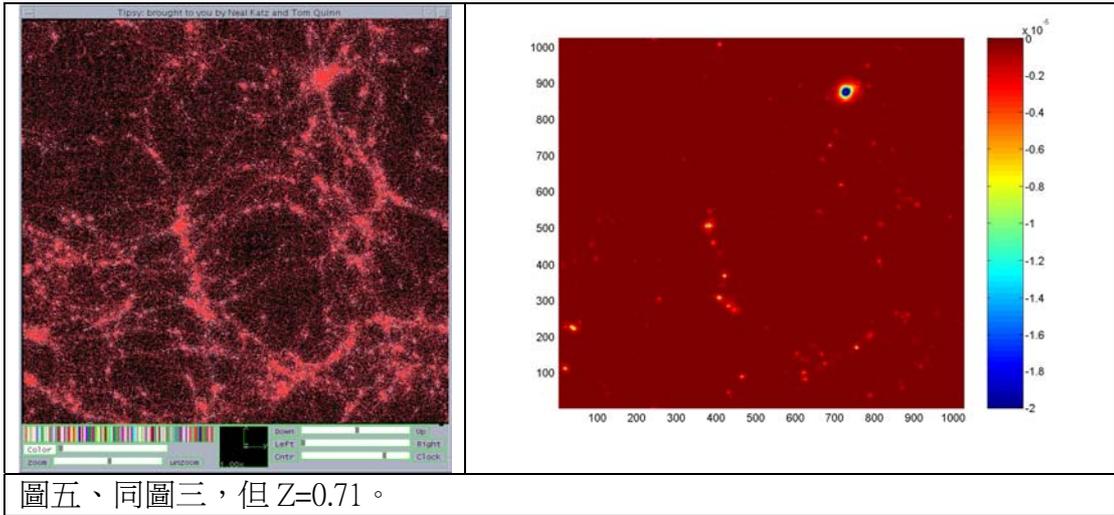
一、 第一個模擬宇宙：溫度之著色範圍為 -2×10^{-5} K 至 0K。



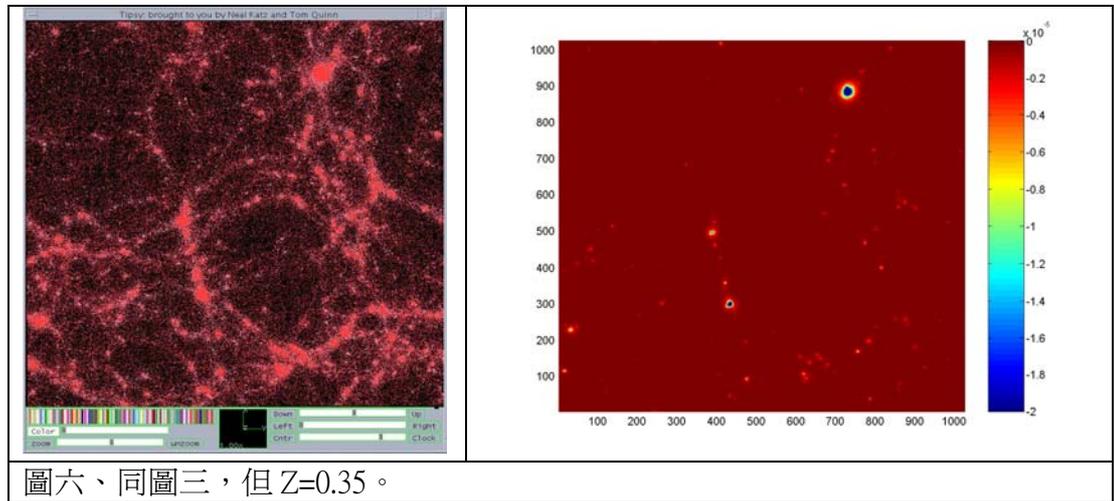
圖三、左邊為宇宙中質點的分布狀況，紅色為一般物質，白色為黑暗物質；右邊為 C 語言和 Matlab 做計算出之 S-Z 效應的強度 ΔT 分布圖。紅移 $Z=3.55$ 。



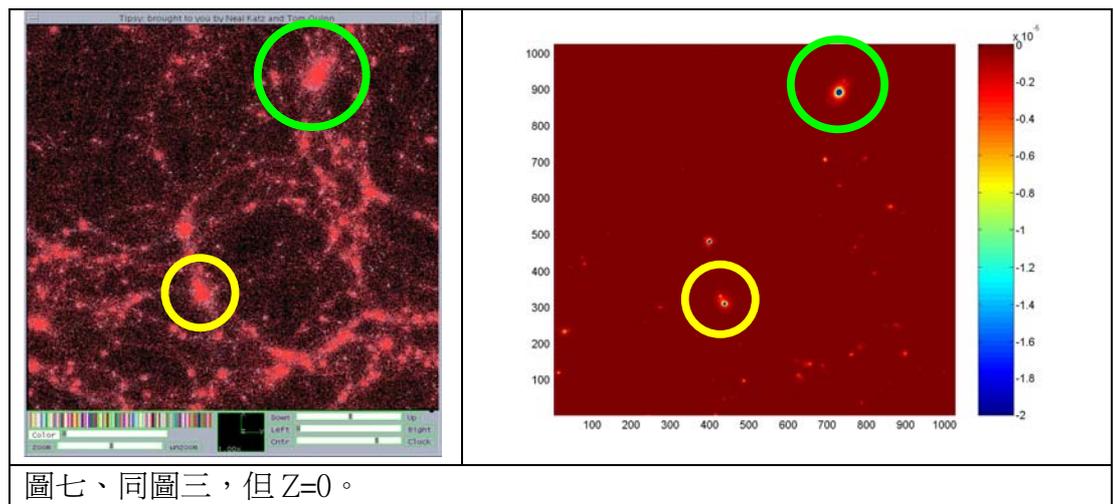
圖四、同圖三，但 $Z=1.22$ 。



圖五、同圖三，但 $Z=0.71$ 。



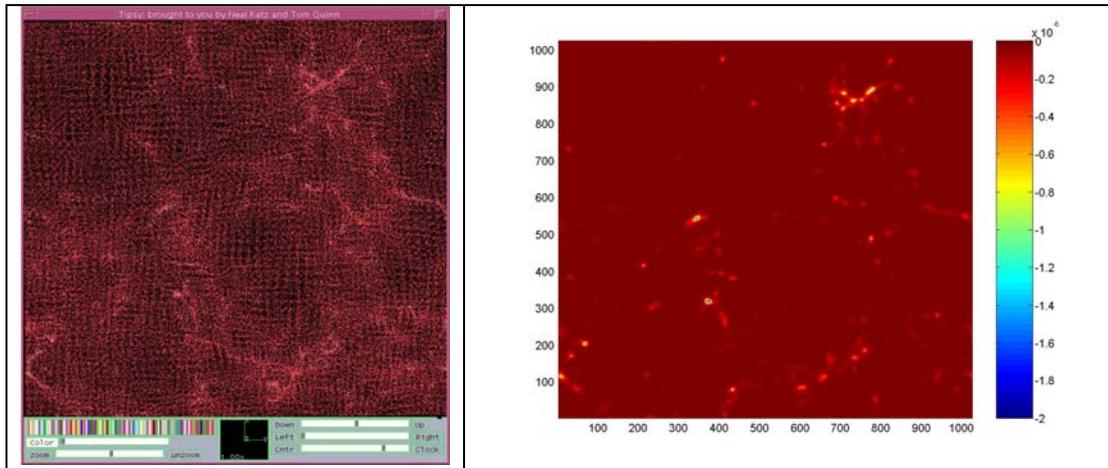
圖六、同圖三，但 $Z=0.35$ 。



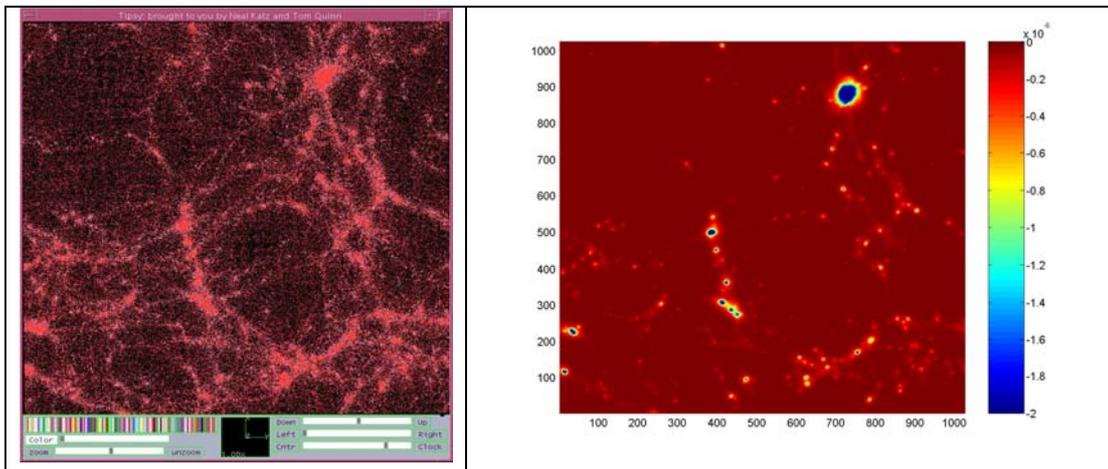
圖七、同圖三，但 $Z=0$ 。

左右相同顏色的圈標示同一個星系團的粒子分布圖(左)和 S-Z 效應的分布圖(右)。

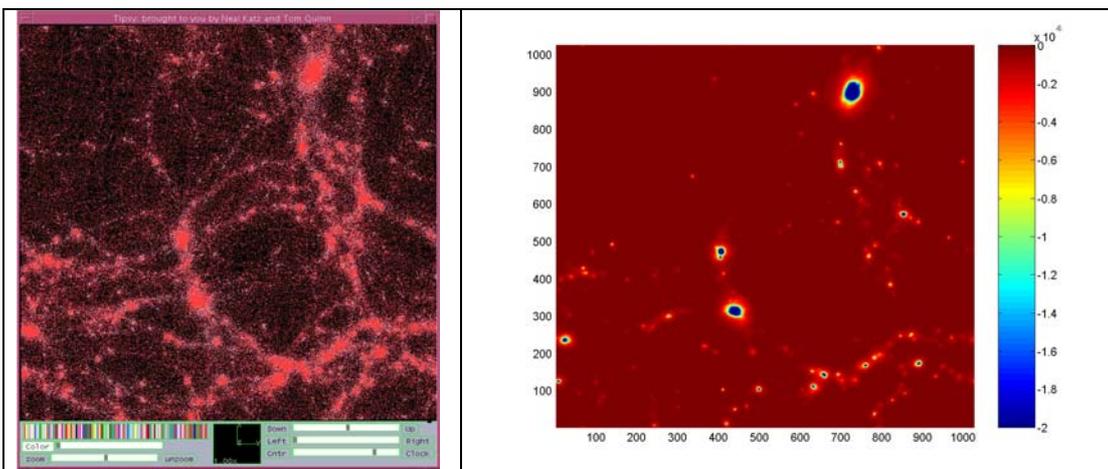
二、 第二個模擬宇宙：溫度之著色範圍為 -2×10^{-6} K至0K。



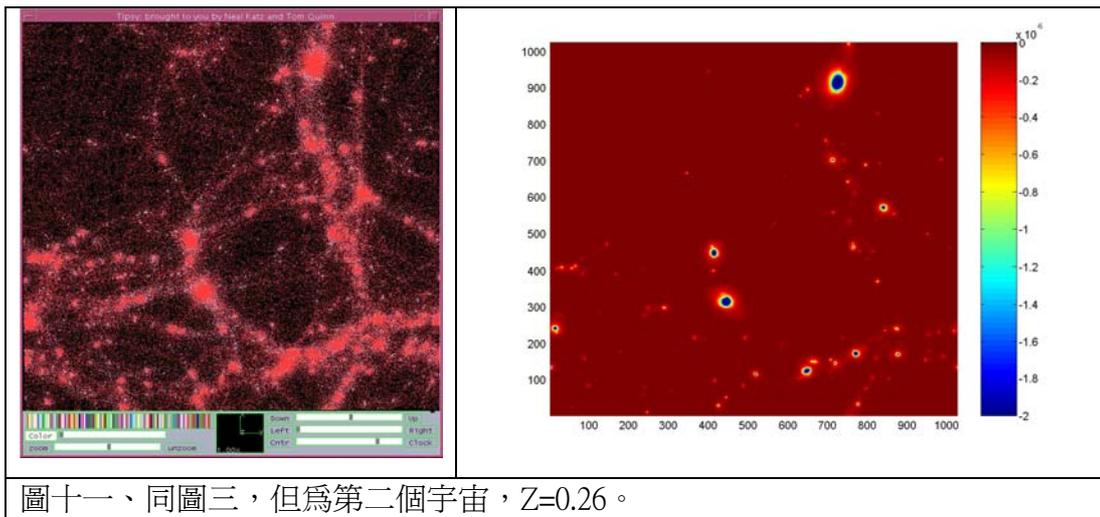
圖八、同圖三，但為第二個宇宙， $Z=4.65$ 。



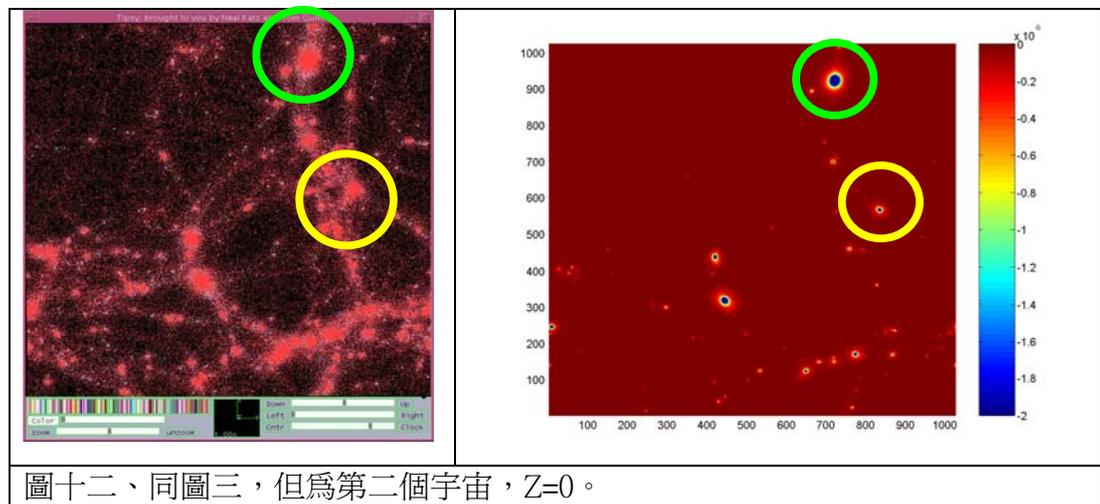
圖九、同圖三，但為第二個宇宙， $Z=1.56$ 。



圖十、同圖三，但為第二個宇宙， $Z=0.71$ 。



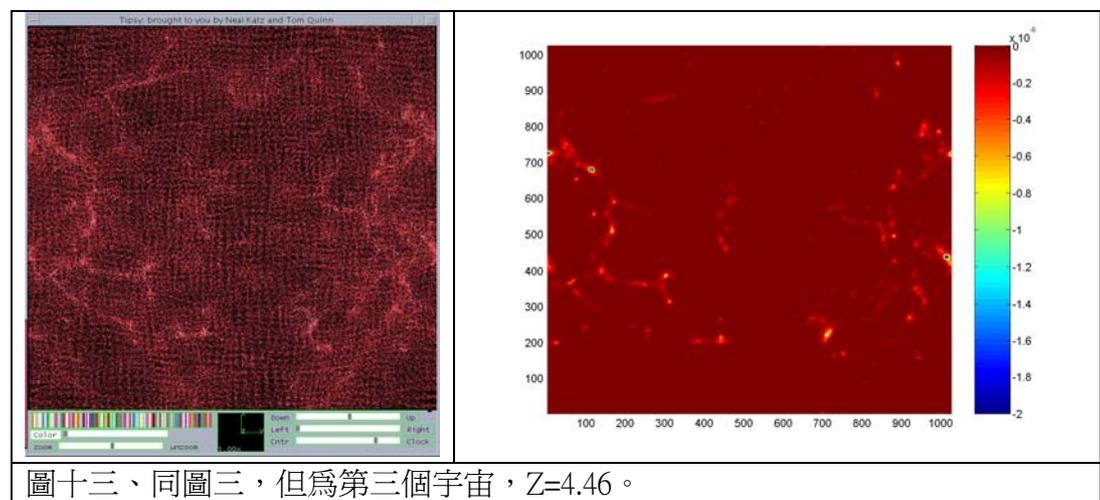
圖十一、同圖三，但為第二個宇宙， $Z=0.26$ 。



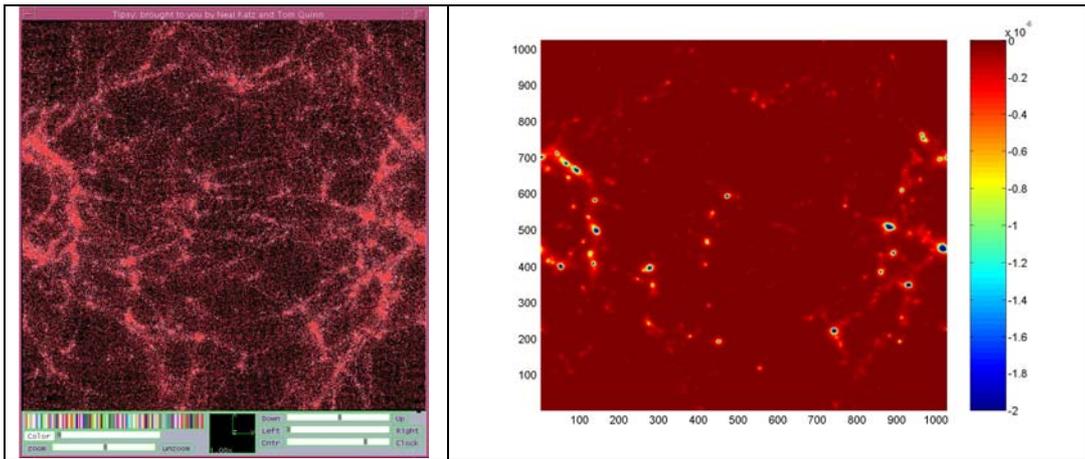
圖十二、同圖三，但為第二個宇宙， $Z=0$ 。

左右相同顏色的圈標示同一個星系團的粒子分布圖(左)和 S-Z 效應的分布圖(右)。

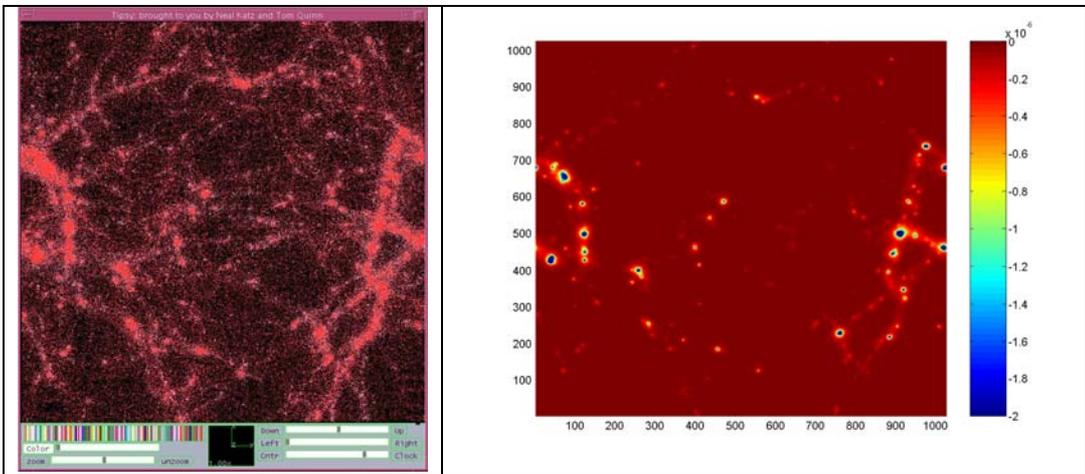
三、 第三個模擬宇宙：溫度之著色範圍為 -2×10^{-6} K 至 0K。



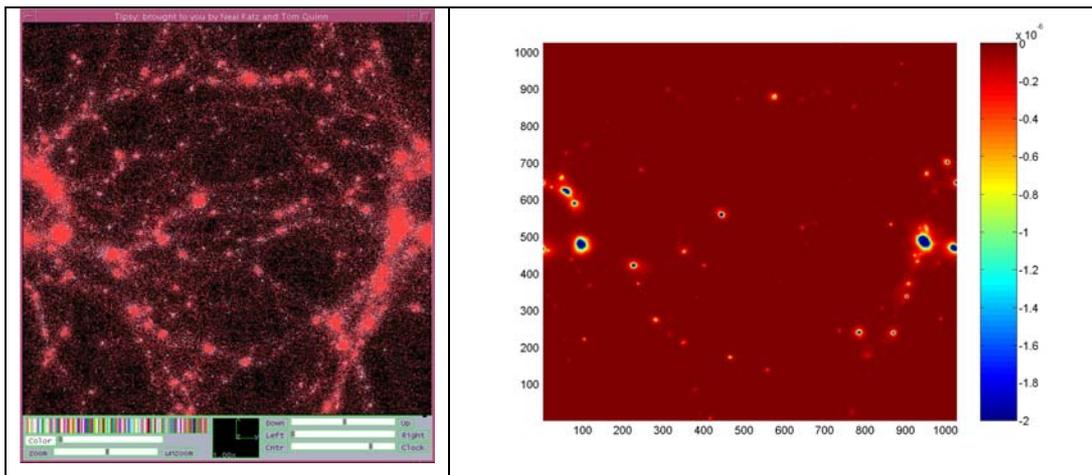
圖十三、同圖三，但為第三個宇宙， $Z=4.46$ 。



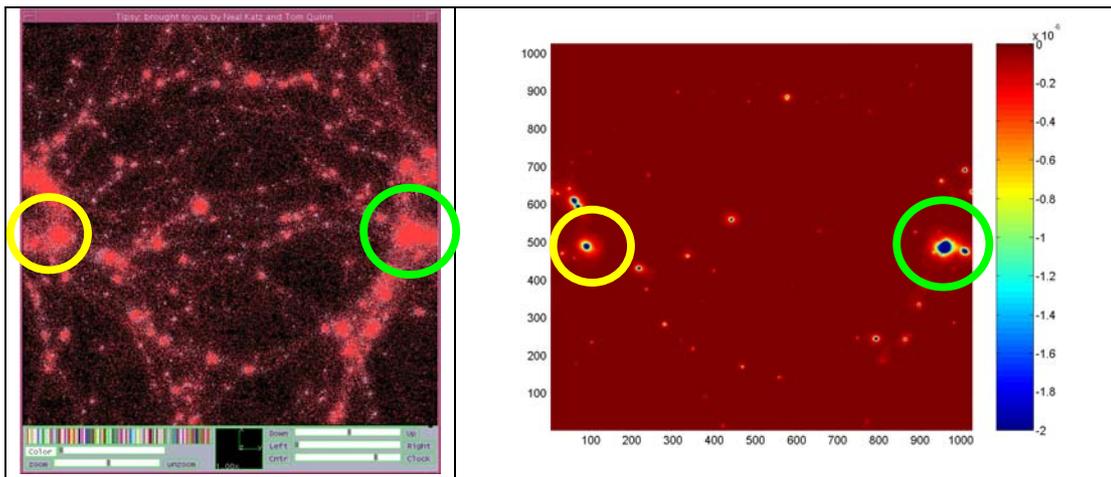
圖十四、同圖三，但為第三個宇宙， $Z=1.78$ 。



圖十五、同圖三，但為第三個宇宙， $Z=1.00$ 。



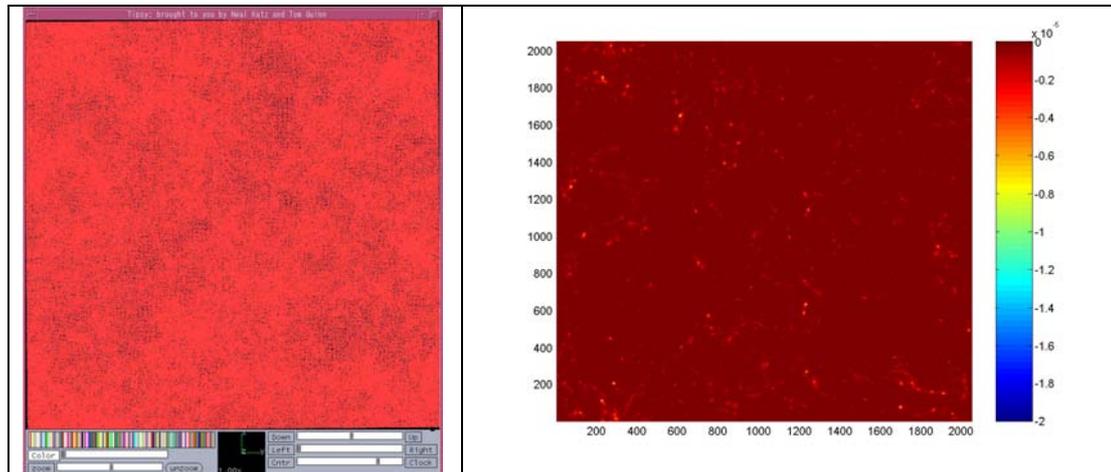
圖十六、同圖三，但為第三個宇宙， $Z=0.22$ 。



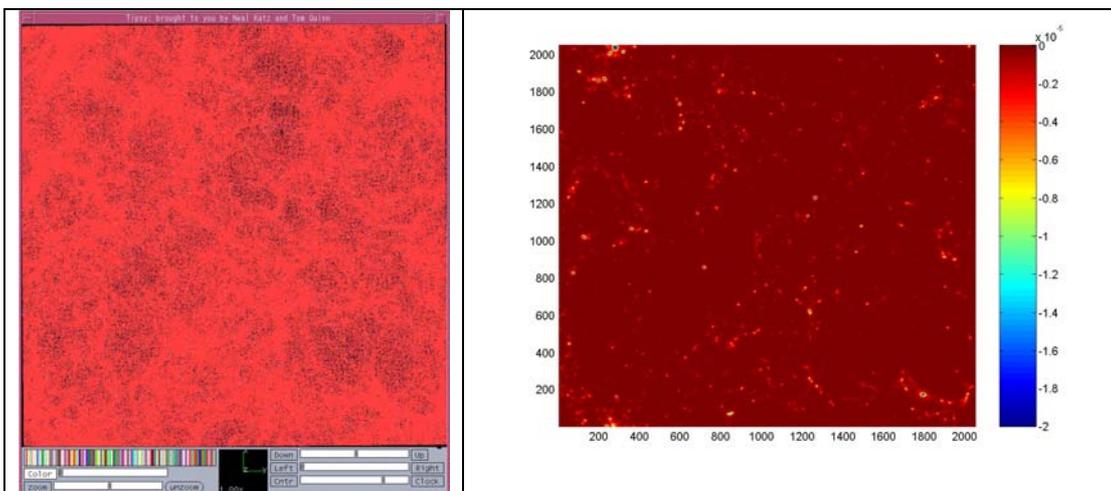
圖十七、同圖三，但為第三個宇宙， $Z=0.97$ 。

左右相同顏色的圈標示同一個星系團的粒子分布圖(左)和 S-Z 效應的分布圖(右)。

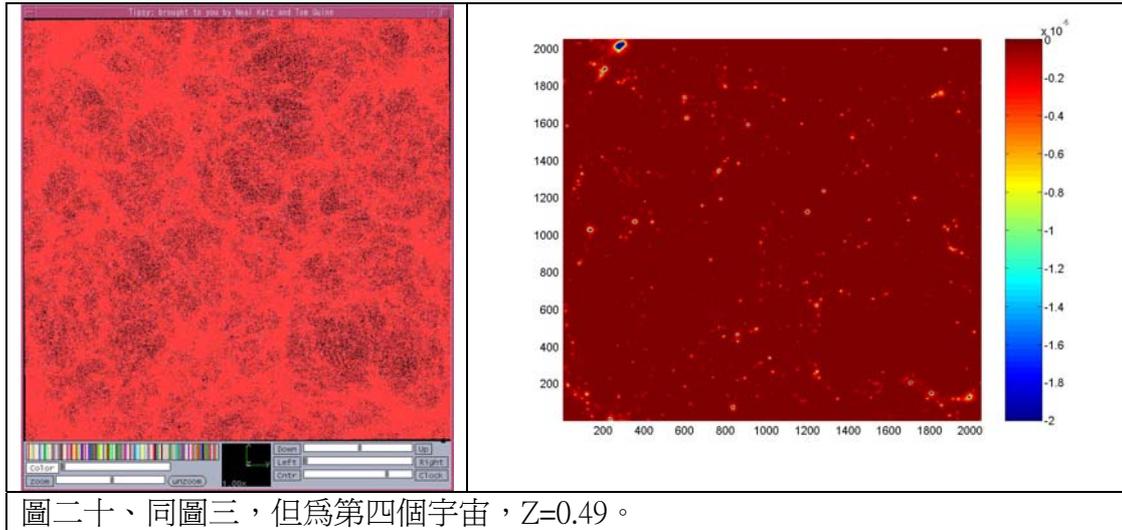
四、 第四個宇宙：溫度之著色範圍為 -2×10^{-5} K 至 0K。



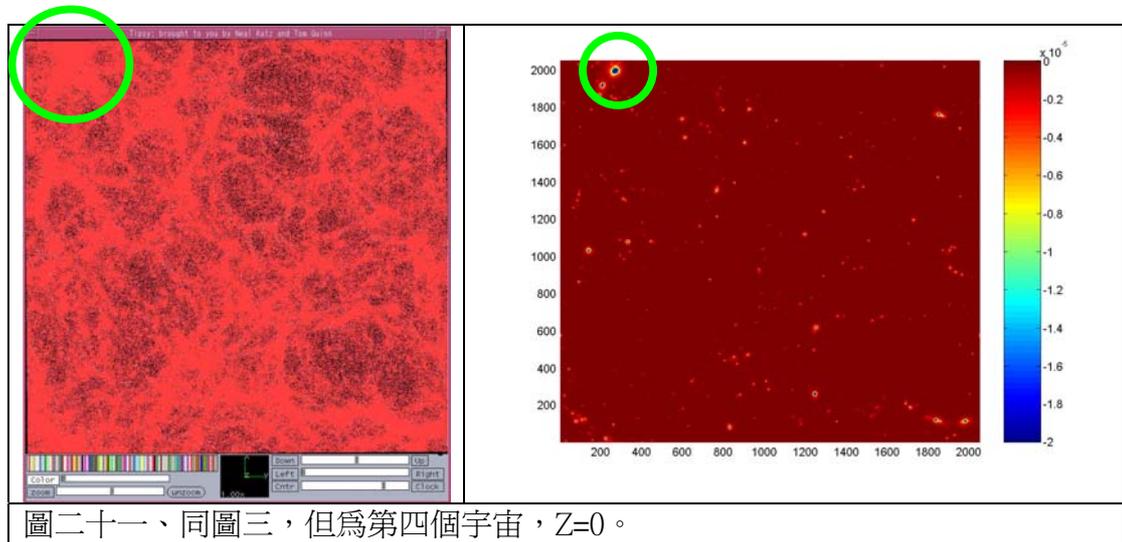
圖十八、同圖三，但為第四個宇宙， $Z=2.87$ 。



圖十九、同圖三，但為第四個宇宙， $Z=1.22$ 。



圖二十、同圖三，但為第四個宇宙， $Z=0.49$ 。



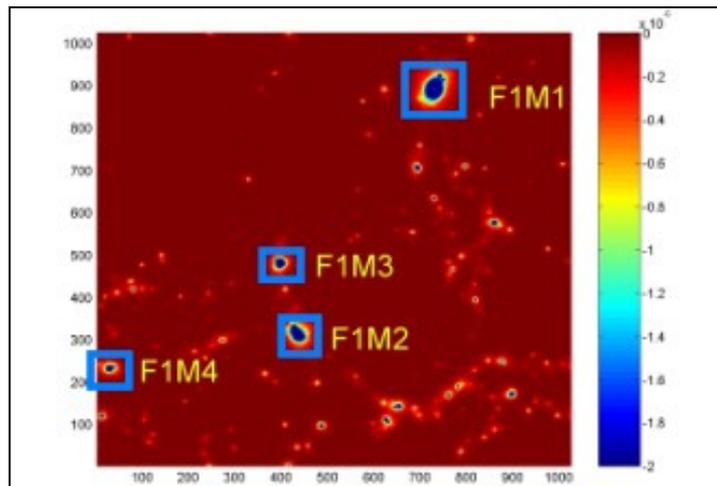
圖二十一、同圖三，但為第四個宇宙， $Z=0$ 。

左右相同顏色的圈標示同一個星系團的粒子分布圖(左)和 S-Z 效應的分布圖(右)。

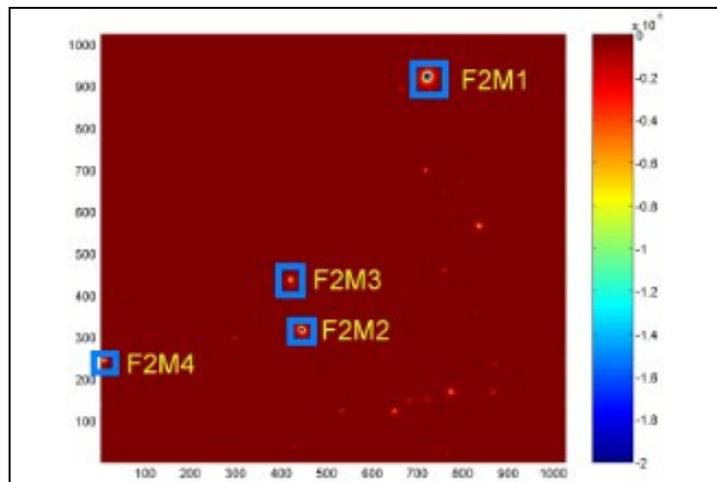
由以上之結果可看出：

- 一、 星系團演化的後期之 S-Z 效應的高溫區會比星系演化前期來的集中。
- 二、 S-Z 效應（即 ΔT 不為 0）只出現在質點密集區，質點稀疏的部分 S-Z 效應就很不明顯。
- 三、 在質量較小的箱子中（即第二個檔案和第三個檔案），其星系團的高溫區溫度比質量較大的箱子中的星系團來的低。

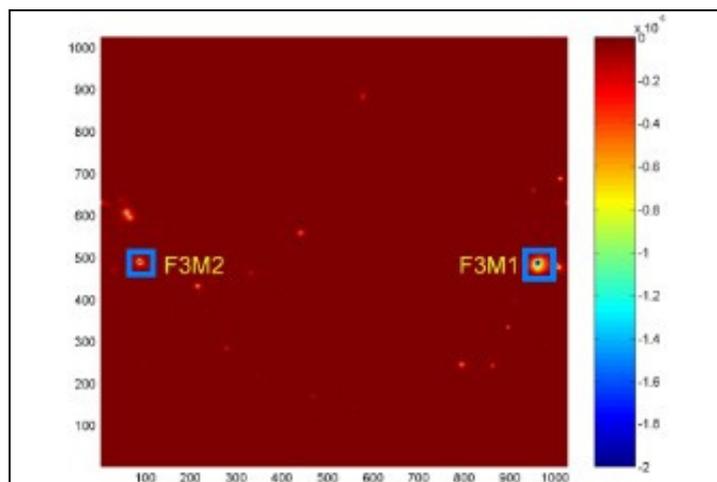
接著我們在四個宇宙中選了 28 個（F1M1、F1M2、F1M3、F1M4、F2M1、F2M2、F2M3、F2M4、F3M1、F3M2、F5M1、F5M2、F5M3、F5M4、F5M5、F5M6、F5M7、F5M8、F5M9、F5M10、F5M11、F5M12、F5M13、F5M14、F5M15、F5M16、F5M17、F5M18）質量為 $10^{13} \sim 10^{16}$ 倍太陽質量的星系團來做分析，分別如下圖。



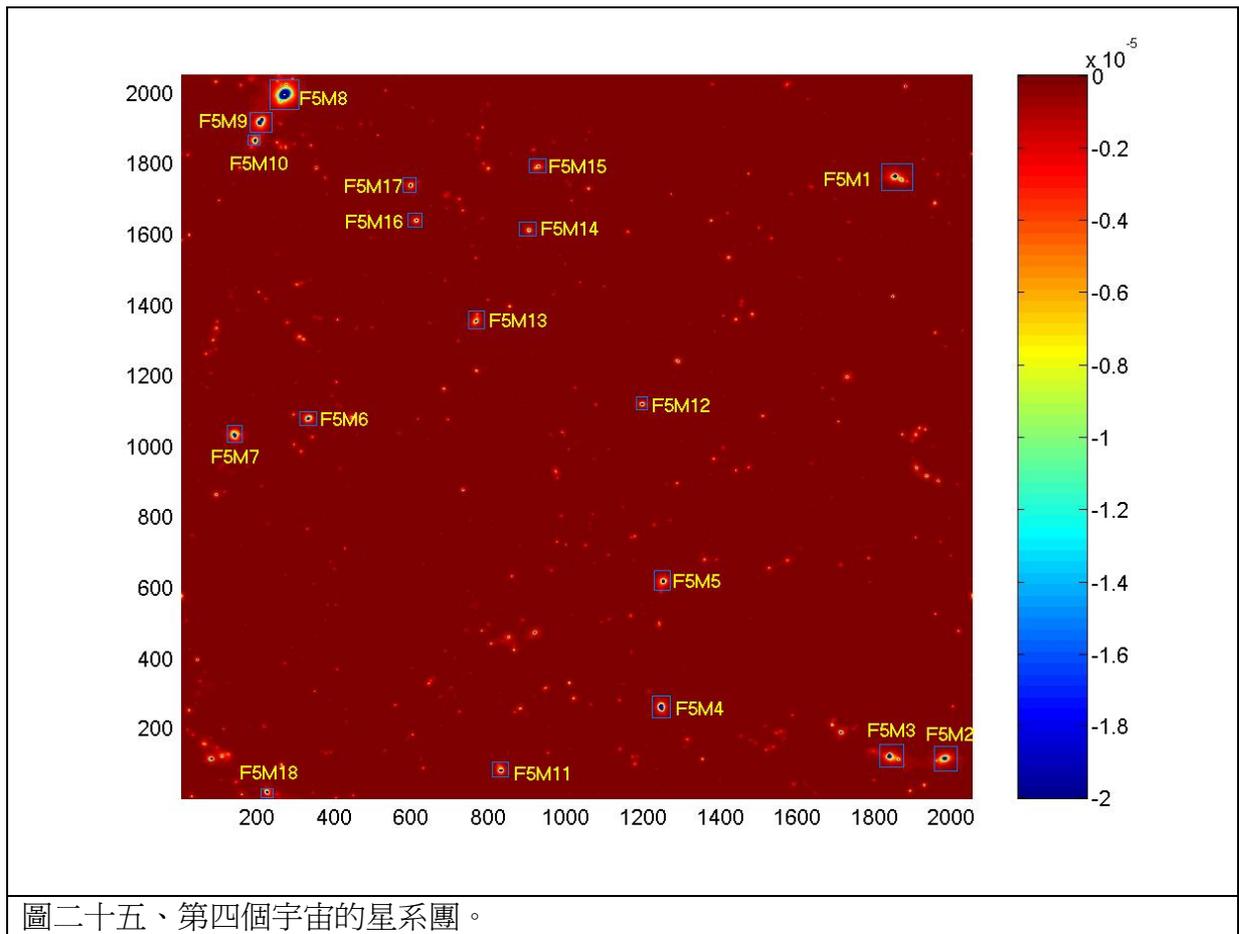
圖二十二、第一個宇宙的星系團。



圖二十三、第二個宇宙的星系團。



圖二十四、第三個宇宙的星系團。

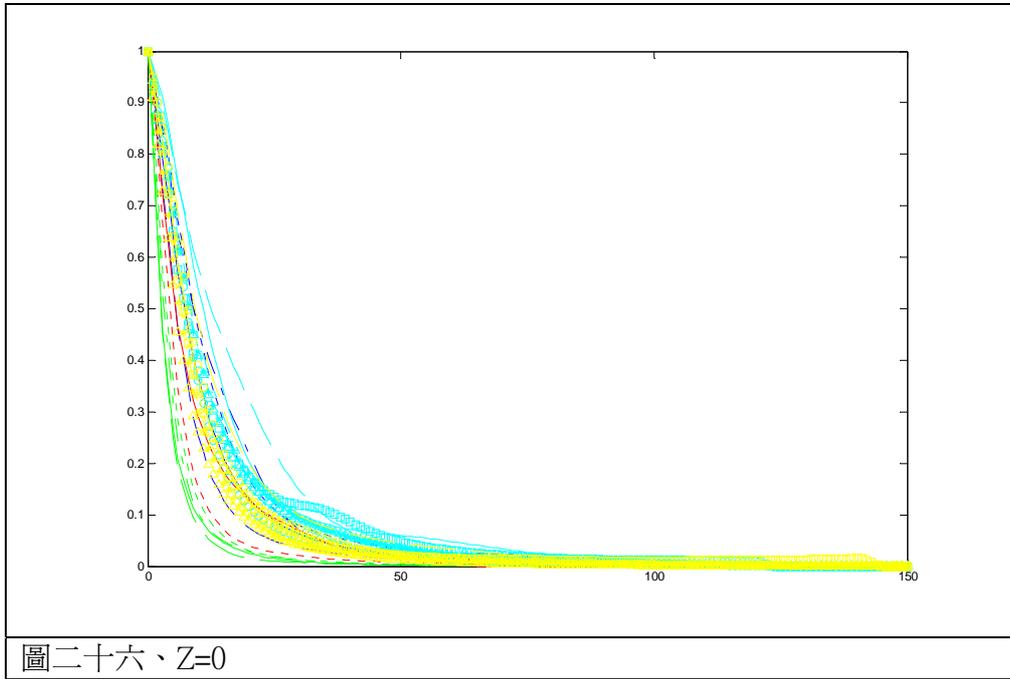


接著，每個宇宙選取三個相同的時間點來做比較，分別是星系團剛形成（著色範圍之最低溫出現，週遭並有溫度的梯度變化） $Z=1.22$ ，現在的時間 $Z=0$ ，以及這兩個時間當中的一個時間點 $Z=0.71$ 。我們進行以下四項的分析：

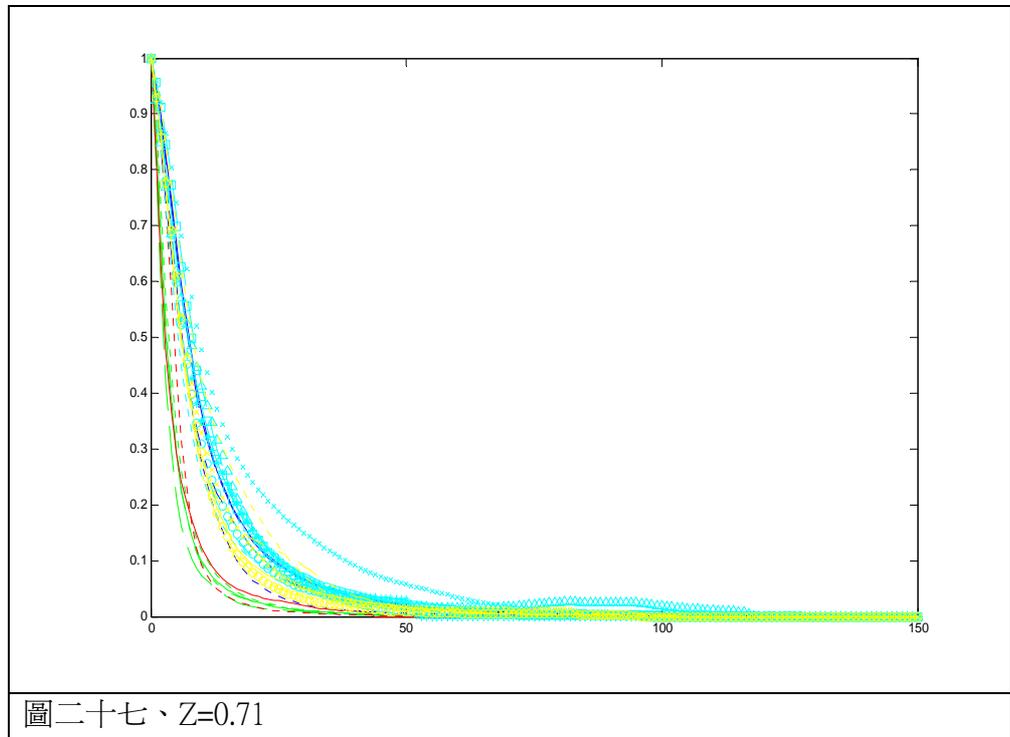
一、與星系團中心距離和 S-Z 強度的關係

以下圖中的縱座標為 $\Delta T(r)$ /中心溫度，橫座標為距離星系團中心的距離 r （單位是 $35h^{-1}Mpc/1024$ ）。各星系團之標色如下表：

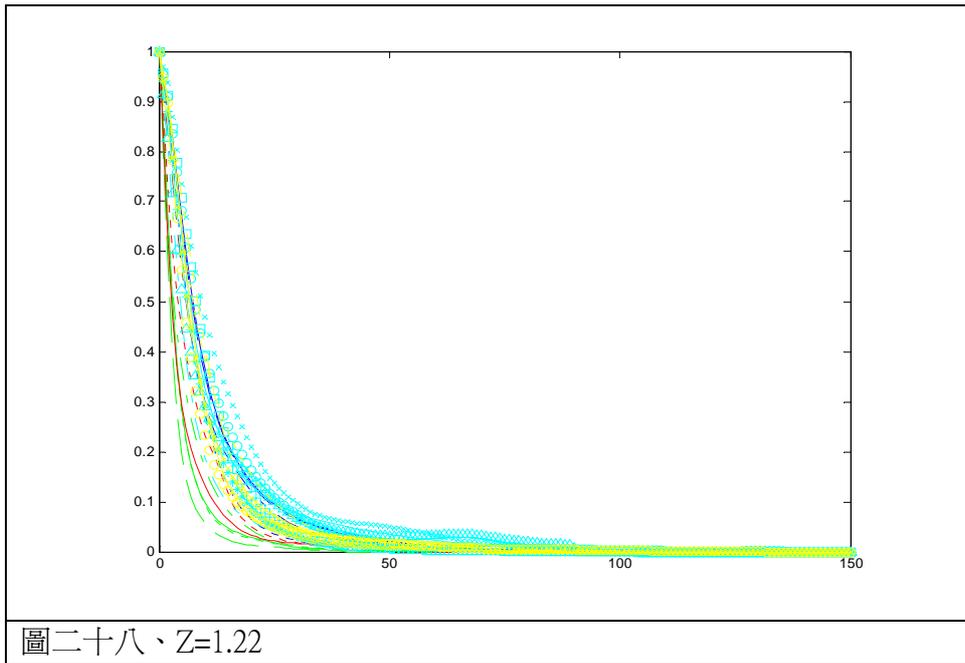
| | | | | |
|------------|--------------|-------------|-----------|------------|
| F1M1 藍色實線 | F1M2 藍色點 | F1M3 藍色點+虛線 | F1M4 藍色虛線 | |
| F2M1 綠色實線 | F2M2 綠色點 | F2M3 綠色點+虛線 | F2M4 綠色虛線 | |
| F3M1 紅色實線 | F3M2 紅色點 | | | |
| F5M1 青色實線 | F5M2 青色點 | F5M3 青色點+虛線 | F5M4 青色虛線 | F5M5 青色圈 |
| F5M6 青色叉 | F5M7 青色三角 | F5M8 青色星號 | F5M9 青色方形 | F5M10 黃色實線 |
| F5M11 黃色點 | F5M12 黃色點+虛線 | F5M13 黃色虛線 | F5M14 黃色圈 | F5M15 黃色叉 |
| F5M16 黃色三角 | F5M17 黃色星號 | F5M18 黃色方形 | | |



圖二十六、 $Z=0$



圖二十七、 $Z=0.71$

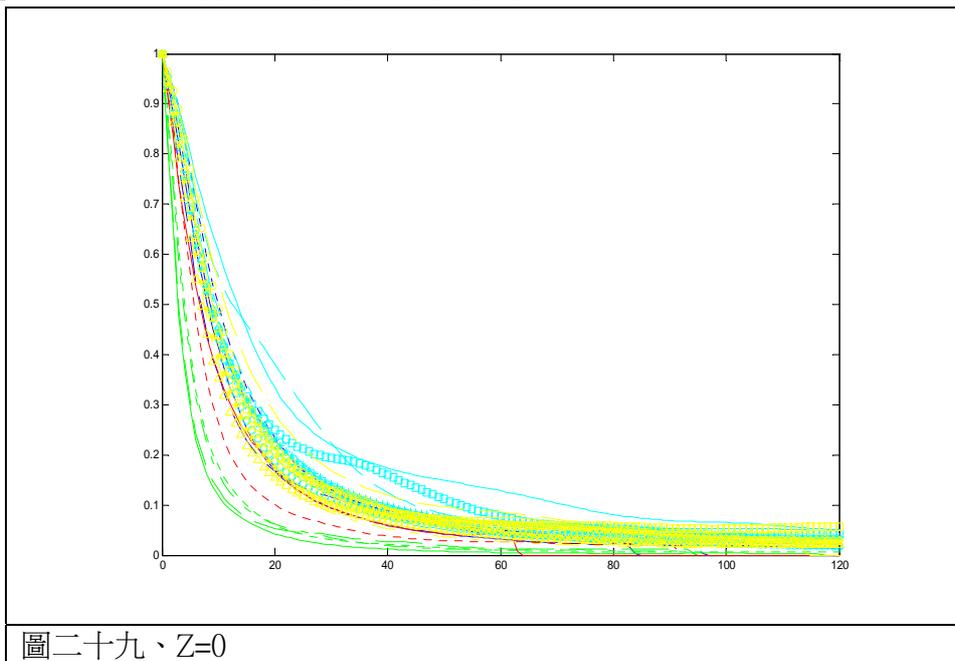


圖二十八、Z=1.22

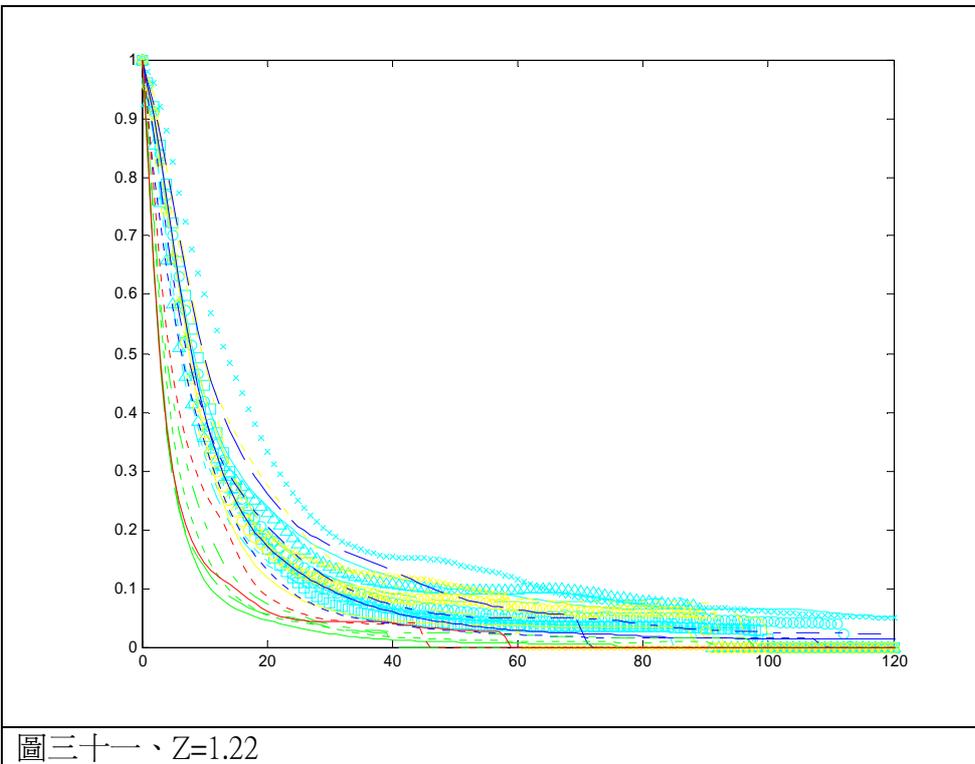
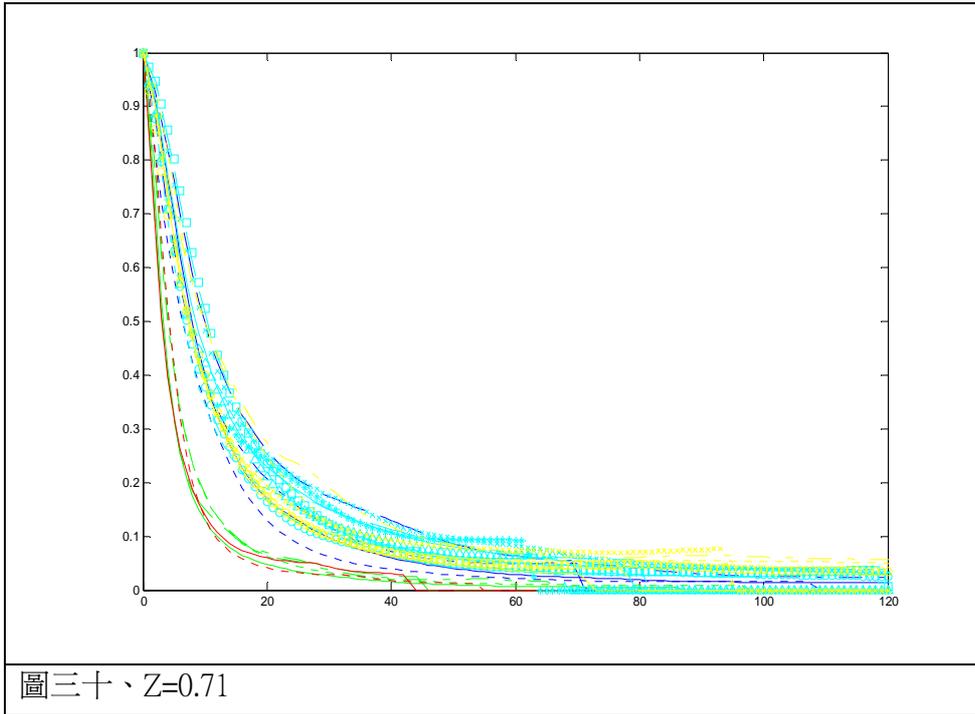
利用 $\Delta T = a \left[1 + \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right]^c$ 的數學模型，讓 Matlab 去找出它的 a、b、c。a 的平均值為 0.97，標準差為 0.023；b 因為受各個星系團總質量大小的影響而有很大的起伏；c 的平均值為 1.0，標準差為 0.22。

二、與星系團中心距離和質量密度的關係

以下圖中的縱座標是質量密度／中心質量密度，橫座標是與星系團中心的距離 r（單位是 $35h^{-1}Mpc / 1024$ ）。曲線顏色所代表的意義如前。



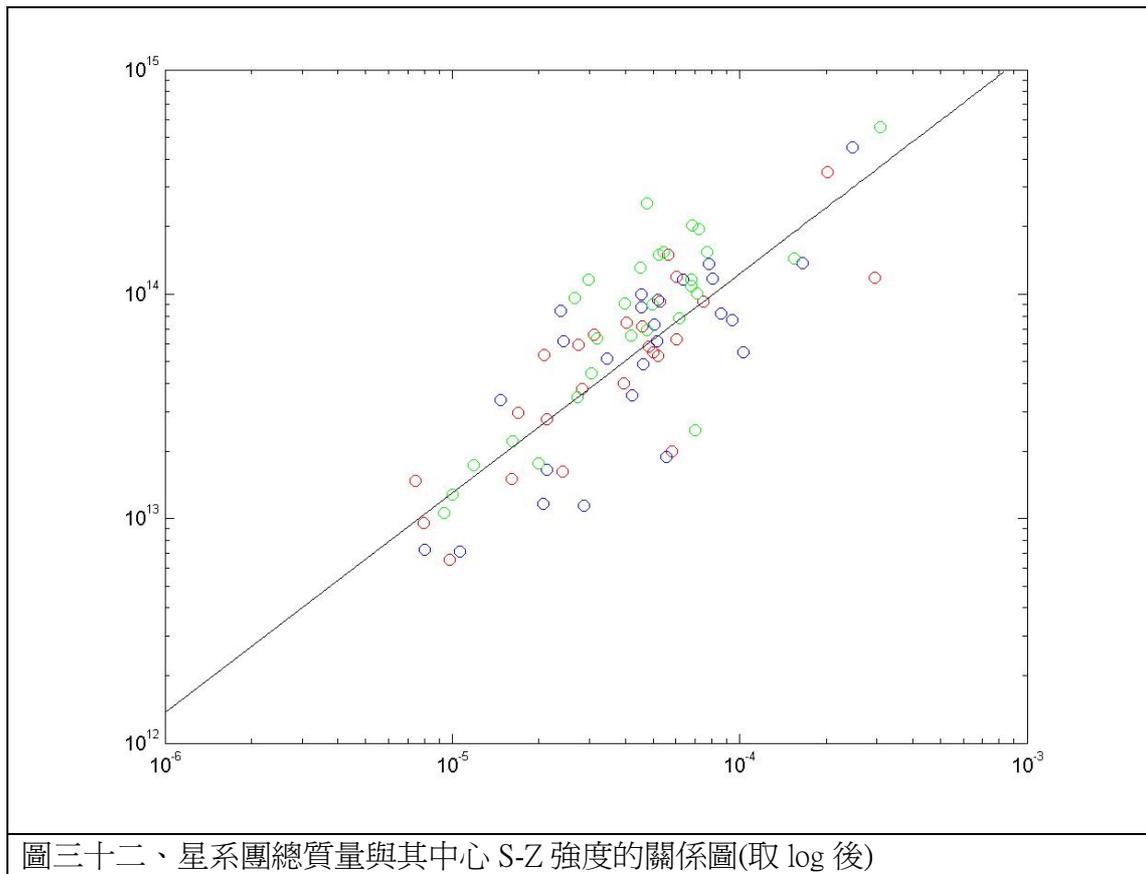
圖二十九、Z=0



利用質量密度= $a\left[1+\left(\frac{r}{b}\right)^2\right]^c$ 的數學模型，讓 Matlab 去找出它的 a、b、c，a 的平均值為 0.98，標準差為 0.026；b 因為受各個星系團總質量大小的影響而有很大的起伏；c 的平均值為-0.71，標準差為 0.087。

三、 星系團總質量與其中心 S-Z 強度的關係

下圖的縱座標是質量(單位太陽質量)，橫座標是 ΔT (單位 k)，由於做出來其結果並沒有線性關係，所以我將兩邊取了 \log_{10} 。

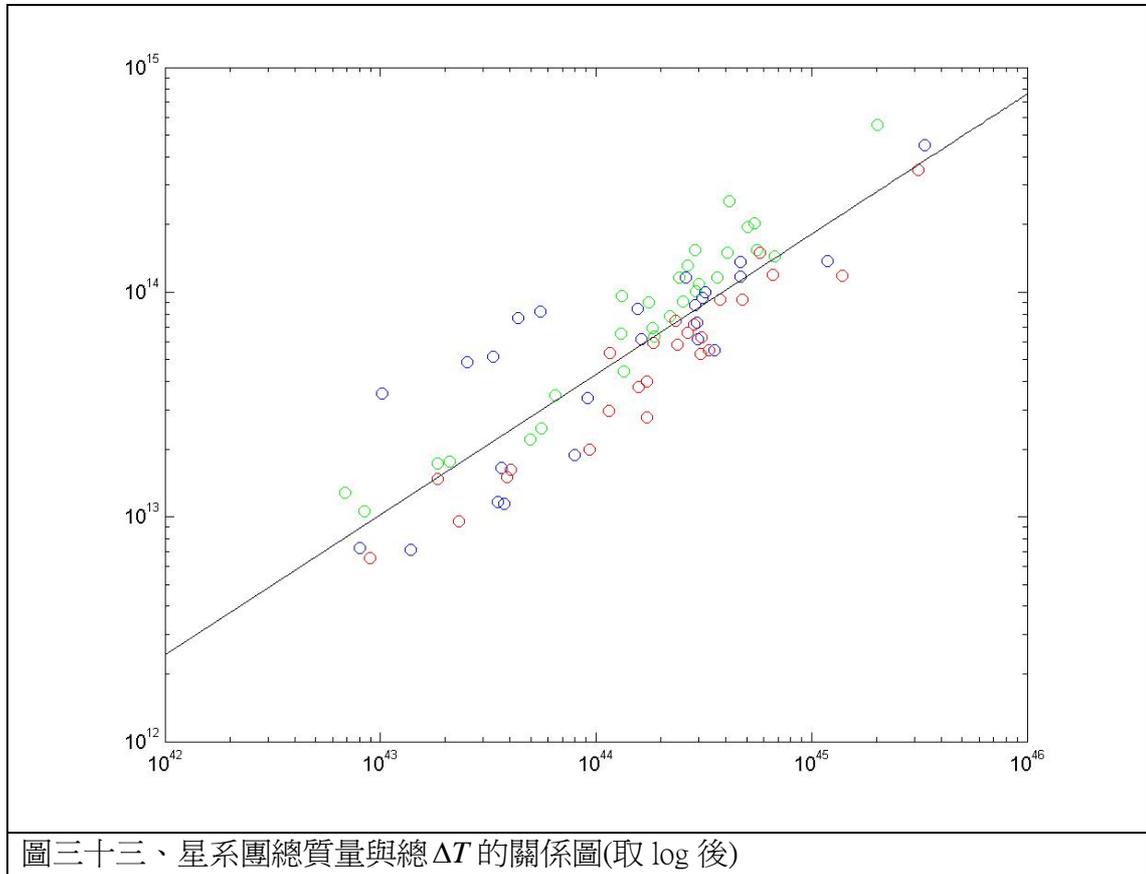


由上圖中的明顯線性帶狀分布，可算出星系團總質量 (M) 其中心溫度(T)的關係為：

$$M = 10^{18.2 \pm 0.360} \times T^{1.00 \pm 0.081} \quad (\text{公式 7})$$

四、 星系團總質量與總 ΔT 的關係

下圖的縱座標是質量(單位太陽質量)，橫座標是 ΔT (單位 $k \times cm^2$)，由於做出來其結果並沒有線性關係，所以我將兩邊取了 \log_{10} 。



由上圖中的明顯線性帶狀分布，可算出星系團總質量 (M) 其總 ΔT (ΔT_{total}) 的關係為：

$$M = 10^{-12.42 \pm 2.035} \times \Delta T_{total}^{0.593 \pm 0.046} \quad (\text{公式 8})$$

陸、討論

- 一、由模擬出的四個宇宙之比較，星系團演化的後期之 S-Z 效應的高溫區會比星系演化前期來的集中，又對照粒子分布圖，發現前者的粒子亦有逐漸集中的現象，這是因為粒子較集中的區域其電子溫度較高，而根據（公式 2）可知，其 S-Z 效應也因而較強。
- 二、在質量較小的星系團中，其星系團的高溫區溫度比質量較大的星系團來的低，其原因同上。
- 三、本分析中所選的星系團之大小及質量均符合觀測。
- 四、第四個宇宙以 F5 編號是因為原先使用的 F4 宇宙的質量過大，粒子數過少，而致每個粒子的質量超過一個星系，有許多不正常的現象發生。但在增加粒子數後(F5)，此現象已獲得明顯改善。
- 五、茲就『伍、研究結果』中之四項主要分析，分別討論如下：
 - (一) 與星系團中心距離和 S-Z 強度的關係：
詳下(請見以下(二)中之綜合討論)
 - (二) 與星系團中心距離和質量密度的關係：
 1. a 的平均值相當接近 1，符合以最高溫中心項四周取同心圓計算溫度的模型。
 2. b 值和質量似乎有關聯性，但這需要更多不同的模擬來加以分析。
 3. c 值描述了溫度和質量密度隨著與中心距離的增加而快速遞減的現象，相對描述了星系團粒子和溫度的集中情形。
 4. 圖二十六~圖三十一中，其曲線有些微不正常的突起和下降，推測這是因為星系團附近仍有其他較小的結構，在計算時一併影響到結果，或者兩個星系團過於靠近，而有互相影響的現象，所以在選取範圍時，對資料範圍有加以取捨而致。
 5. 不同的時間之 c 值可能有所差異，若個別加以分析，或許能得到『集中程度』和『時間』的關係。
 6. 在清楚了解 a 、 b 、 c 三者後，將來觀測上若能得到星系團的質量或密度，即可透過 c 值了解此星系團隨著半徑增加其各點質量和溫度的分布關係。
 - (三) 星系團總質量與其中心 S-Z 強度的關係：
由此計算出的公式，在觀測技術進步後，若能得到一個星系團中心的 S-Z 效應強度(轉換為溫度)，即可得到此星系團的總質量。
 - (四) 星系團總質量與總 ΔT 的關係：
圖三十三的分布比圖三十二更為接近線性，因此其線性模型可較準確地描述此模擬結果。所以在觀測上，可利用公式八求得星系團總質量。
- 六、以上所得到的結果應與觀測結果加以比較 (例如：利用 (公式 7) 及 (公式 8) 得到的星系團總質量、實際星系團是否符合 $a \left[1 + \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right]^c$ 、 b 值和 c 值等)，若與其他觀測方式所得到的資料符合，即表示我們目前所採信的宇宙模型和宇宙參數，又獲得進一步地驗證；若不符，則表示我們目前對宇宙的了解，仍需要修正並作進一步地探討。

七、以下是我們未來可從事的進一步研究及探討：

- (一) 有無黑暗能量對星系團 S-Z 效應是否有所影響？將兩者的結果比較，再對照未來的觀測結果，將可反推黑暗能量的存在與否，或其量質。
- (二) 探討 S-Z 效應和星系團演化階段的關係。
- (三) 探討 S-Z 效應和星系團與地球的距離關係。

柒、結論

本研究藉由電腦的多體模擬及分析等技術，獲得以下關於星系團的結論：

- 一、星系團演化的後期之 S-Z 效應會比演化前期來得集中。
- 二、S-Z 效應只出現在宇宙中密度高的區域，也就是星系團所在的區域。
- 三、星系團的 S-Z 效應之強度 $\Delta T = a \left[1 + (r/b)^2 \right]^c$ ，其中 r 為至星系團中心的距離， a 、 b 、 c 均為常數，且 $c = -1.0 \pm 0.22$ 。
- 四、星系團的質量密度 $= a \left[1 + (r/b)^2 \right]^c$ ，且 $c = -0.71 \pm 0.087$ 。
- 五、星系團總質量 M （單位為太陽質量）與其中心 S-Z 強度 ΔT （單位為 K）的關係為：
 $M = 10^{18.2 \pm 0.360} \times T^{1.00 \pm 0.081}$ 。即星系團的核心之 S-Z 效應會隨質量的增加而增強。
- 六、星系團總質量 M 與其總積分 ΔT (ΔT_{total}) 的關係為：
 $M = 10^{-12.42 \pm 2.035} \times \Delta T_{total}^{0.593 \pm 0.046}$ 。
- 七、以後將可根據結論五和結論六，來推算出所觀測到之 S-Z 星系團的質量。

以上這些研究成果，將可在短期的未來，直接應用在許多期待中的國內、外之觀測結果上，以揭開星系團的神祕面紗。

捌、參考資料

A.Jenkins, C.S.Frenk, F.R.Pearce, P.A.Thomas, J.M.Colberg, S.D.M.White, H.M.P Couchman, J.A.Peacock, G.Efstathiou, and A.H.Nelson (The Virgo Consortium), (1998) ‘Evolution of Structure in Cold Dark Matter Universes’ *Astrophysical Journal*,499,20-40.

Barber A. J.,(2002), ‘The redshift and scale dependence of the cosmic shear signal from numerical simulations’ , *MNRAS*, 335, 909 (astro-ph/0108273).

Barber A. J. and Taylor A. N., (2003), ‘Shear and magnification angular power spectra and higher-order moments from weak gravitational lensing’ , *MNRAS*, 344, 789 (astro-ph/0212378).

Carlstrom, J.E., Holder, G.P., Reese, E.D. (2002) ‘Cosmology with the Sunyaev-Zel’ dovich Effect’ , *Ann.Rev.Astron. Astrophys.* 40, 643

Chiueh, T.H., Wu, J.H.P (2002) ‘Array for Microwave Background Anisotropy: A Frontier Microwave-Background Telescope’ , *A.A.P.P.S. Bulletin*, 12, 21

Hydra website: <http://coho.physics.mcmaster.ca/hydra>

Jones,C.& Fprman W. (1984)*ApJ.* 276,384

Kolb, E.W., Turner, M.S., ‘The Early Universe’ , 2nd Ed., Addison-Wesley Publishing Company, 383, 1994

P.A.Thomas,J.M.Colberg,H.M.P Couchman, G.Efstathiou, C.S.Frenk, A. Jenkins, A.H.Nelson, R.M.Hutchinhgs, J.A.Peacock, F.R.Pearce, S.D.M.White, (1998), ‘The structure of galaxy clusters in various cosmologies’ , *MNRAS*,296,1061

Runyan, M.C., et al. (2003) ‘ACBAR: The Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver’ , *Astrophys. J. Suppl.*, 149, 265

Silva, A.C., Barbosa, D., Liddle, A.R., Thomas, P.A. (2000) ‘Hydrodynamical simulations of the Sunyaev-Zel’ dovich effect’ , *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 317, 37

Spergel, D.N. et al. (2003) ‘First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters’ , *Astrophys.J.Suppl.* 148, 175

T.Theuns, A.Leonard, J.Schaye, G.Efstathiou, F.Pearce, and P.Thomas (1998) ‘P3M-SPH simulations of the Ly-alpha forest’ , *MNRAS*,301,478

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 地球科學科

第一名

040509

星系團照妖鏡

臺北市立第一女子高級中學

評語：

1. 報告內容有些不清楚，或太簡略。
2. 能掌握天文知識的脈動。
3. 能利用電腦以及物理知識，探討星系團之質量及其特色，值得肯定。
4. 如有實際觀測印証更好。