

銀河系核心及盤面的隨機恆星形成歷史

黃癸雲 葉永烜

國立中央大學天文研究所

摘要

星系的演化過程以及形成的歷史，一直都是複雜且難以回答的問題。許多天文學者致力於研究星系的形成以及星系的演化。Seiden 和 Gerola(1978) 發展了"隨機自我傳遞之恆星形成模型(SSPSF 模型)"，他們宣稱使用簡單的隨機方法，也可以解決複雜的星系問題。

本文將以 Gerola 和 Seiden (1978)二維 SSPSF 模型為出發點，先建造 SSPSF 模型，然後進一步建立由三維核心加上二維盤面所組成的螺旋星系，並且加入星系外部氣體雲氣掉入星系中的效應，促使恆星形成。並以銀河系為例子，模擬不同波段下星系的型態以及星系在不同時間的演化情形。

關鍵詞： 星系，星系演化

1. 概論

一般來說，螺旋星系的螺旋狀結構和星系中成群的年輕亮星、氣體、塵埃有密切的關連。且由於差動自轉，這些成群的年輕亮星都傾向於聚集分佈在螺旋的結構上。螺旋星系旋臂的形成是否跟這些年輕亮星的聚集有關連呢？還是只是恰巧分佈的在旋臂上呢？這些問題一直是天文學工作者所感興趣也是一直想知道的。旋臂的形成到底是屬於局部性的過程還是屬於整體性的過程，到現在還不是很清楚。所謂局部性的旋臂形成過程是指年輕的 O、B 型恆星及其演化造成的結果；整體性的旋臂形成過程則是指旋臂由星系核心延伸到星系邊緣並且一直持續存在的結構。根據 Lin 和 Shu (1964)的重力密

度波理論，成功的模擬出螺旋星系明顯的旋臂構造，此理論認為旋臂的形成是屬於整體性的行為。

但是有些理論天文學家覺得旋臂的形成不一定是整體性的行為，有可能是局部性的年輕恆星成群聚集所造成的。Gerola 和 Seiden (1978)及 Gerola et al. (1980)提出 "隨機自我傳遞之恆星形成模型 (Stochastic Self-Propagating Star Formation Model)" (簡稱 SSPSF 模型)，認為明顯旋臂的形成完全由局部性的行為所主導。根據這個模型，他們不僅可以模擬出螺旋星系的旋臂（例如：M81, M101(圖一)等大型螺旋星系），更進一步的應用到矮星系(dwarf galaxies)的形成，並由此基礎建構不同星系的恆星形成歷史

M81



M101



圖一：(A)BATC(Beijing-Arizona-Taiwan-Connecticut Multicolor Sky Survey)合作計畫所取得之 M81 (Kong et al 2000)和 M101(星系圖像取得：<http://www.seds.org/messier/Jpg/m101.jpg>)

(Star Formation History)。1983 年, Statler et al. (1983)和 Comins(1983)引進星系盤面有厚度的論點,在他們的模型中將原來的 SSPSF 模型以三維系統考慮星系盤面。

綜合以上論點及 Gerola 及 Seiden (1978)和 Comins(1983)等人的 SSPSF 計算,我們領先建立了由核心(三維)加上薄的盤面(二維)組成的螺旋星系,並綜合許多對於動態氣體在星系形成時從外掉落至星系中的研究(Larson, 1976;Matteucci & Francois, 1989; Recchi et al.,2001),我們將這個論點加入模型的氣體累積計算中,並也希望能未來能將恆星金屬演化的過程加入,將其結果與

觀測資料比較。

2. 隨機自我傳遞之恆星形成模型(SSPSF 模型)

星系演化過程和恆星形成歷史,是很複雜且難以解答的問題。Lin 和 Shu(1964)以重力密度波理論成功的解釋螺旋星系的形成機制。但是,重力密度波理論對於一般初階天文學習者而言,是個複雜且不易理解的理論。

Seiden 和 Gerola (1978)發展了"隨機自我傳遞之恆星形成模型(SSPSF 模型)",使用簡單的隨機方法,宣稱他們也可以解釋螺旋星系旋臂的形成以及螺旋星系的恆星形成歷史。以簡單的方法解釋複雜的星系問題,SSPSF 模型有效提供初學星系者對於星系的形成以及歷史,能夠很容易的進入情況。

以下是我們跟隨 Gerola 等人的觀念,一步一步建立模型的過程,希望能夠藉由建造這個模型的過程來瞭解星系演化和恆星形成的關係。

星際雲氣中誘使恆星形成的機制主要受到波動的擠壓所造成。這些波動的來源主要由超新星爆炸產生向外擠壓的壓力波或者是 O、B 型恆星吹拂的恆星風和強烈的紫外線輻射對其鄰近雲氣造成的影響(例如:薔薇星雲(NGC 2244),圖二)。假設原始星系雲氣中,形成的恆星都是大質量恆星(O、B 型恆星),大質量星最終會以超新星的形式爆炸,將物質分散在分子雲中。同時,超新

星爆炸產生的波動擠壓附近分子雲，使分子雲的密度瞬間增加，使得分子雲形成恆星的機率變大。但並不是每塊雲氣都一定會產生恆星，所以採用隨機的恆星形成。如此反覆進行，加上星系的差動自轉，使得恆星形成的活動逐漸傳播至整個盤面 (Gerola & Seiden 1978)。

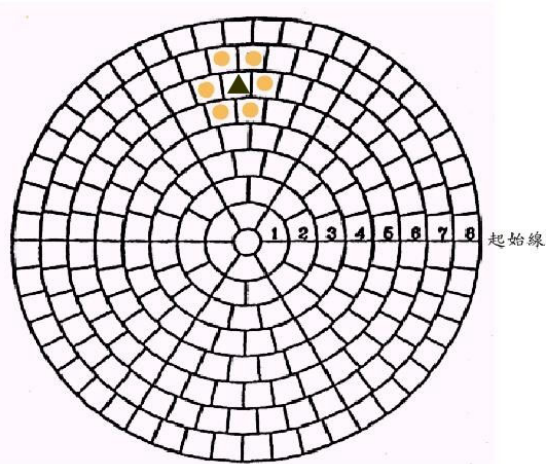


圖二：薔薇星雲

2.1 SPSF 模型簡介：

設星系是個二維的盤子，暫且不考慮星系核心部分，盤子由等半徑的同心環所組成，每一環都劃分成數個等面積區塊 (如圖三)。模擬的時間單位間隔是以恆星從形成到超新星爆炸的時間為一單位。此模型中，每一區塊只能生成一顆恆星，而在真實星系中一點則代表一個星團。也就是說，每一區塊的恆星形成其實是一個星團的形成。有恆星形成的區塊我們稱為"活躍區塊(active cell)"，但是活躍區塊只存在一個時間單位，也就是說恆星在下一個時間單位中就消失不見了。

每個區塊都有屬於自己的恆星形成機率，稱做"自發性機率 (spontaneous probability)";除了自發性機率外，當區塊有恆星形成時，跟它緊鄰的區塊在下一個時間單位會有另一個恆星形成機率，稱做"誘發性機率(stimulated probability)"，此機率比自發



圖三：SSPSF 模型的二維盤子

性機率高，換句話說，屬於活躍區塊的鄰居者，較容易被誘發而變成活躍區塊。所謂的"鄰居"，表示跟活躍區塊的邊界有接觸的都叫做鄰居。在圖三中，三角形表示活躍區塊，而和活躍區塊的邊界有接觸的區塊都用圓圈表示，所以三角形由許多個圓圈包圍起來，這些圓圈就是鄰居。

參數	N	P_{st}	P_{sp}	τ_r	V (km/s)	V_I (km/s)	G(Kpc)
數值	50	0.28	0.0002	11	200	20	15

表一：SSPSF 模型參數表

2.2 參數介紹：

SSPSF 模型中主要有五個參數，以下對這五個參數作詳細的介紹：

- (a) N (同心環的個數)：代表星系的大小，每個同心環寬皆為 ΔR 。
- (b) τ_r (回復週期)：有恆星形成的區塊重新產生恆星所需要的時間間隔。
- (c) P_{st} (誘發性機率)：活躍區塊周圍鄰居在下一個時間單位中，產生恆星的機率。
- (d) P_{sp} (自發性機率)：每個區塊自身產生恆星的機率。
- (e) V (旋轉速度曲線)：星系盤面最大旋轉速度(假設星系盤面的旋轉曲線是平坦的)。

2.3 基本單位計算：

由於實際的參數計算數字太繁雜，為了方便計算，我們使用基本的單位於 SSPSF 模型上，像是：恆星演化的時間單位 (δt)、同心環的半徑 (即區塊的寬度 ΔR)，作為方便其他計算的單位。藉由知道基本單位則可反推現實星系的一些物理量。

$$\delta t = \frac{G}{NV_I} \quad (2.1)$$

$$\Delta R = \frac{G}{N} \quad (2.2)$$

其中 G :星系的半徑(kpc)； N :同心環個數； V_I :超新星爆炸遺跡的傳播速度。

2.4 SSPSF 模型的建造:

我們使用和 Gerola 相同的參數，以及星系的物理量 (見表一)。將這些參數帶入公

式(2.1)和(2.2)中，可知到一個時間單位 (δt) 相當於 1470 萬年，而區塊的寬度 (ΔR) 為 300 pc。

我們採用極座標(r, θ)表示每個區塊的位置。 r 指同心環和圓心間距離， θ 指區塊跟起始線的夾角(圖三)，中心圓圈半徑為同心環寬度的一半(即 $0.5 \Delta R$)。同心環的區塊個數是以 6 為間隔呈等差級數的增加，第一環有 6 個區塊，第二環有 12 個區塊，以此類推，第五十環就有 300 個區塊。由此可知道每個同心環中每個區塊所佔的角度，就可以標示出所有區塊的位置。

星系的最大旋轉速度為轉速 V ，因為角速度(angular velocity)隨著距離而不同，表示每個同心環的速度不一樣。根據旋轉原理： $V = r\omega$ ；其中， r ：星系的半徑， ω ：角速度

$$\omega = \frac{V}{r} \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\delta t} \text{ (degree/s)} \quad (2.4)$$

其中 $\Delta\theta$ ：角度移動量； δt ：時間單位隔。

由公式(2.3)和(2.4)得知： $\Delta\theta = \omega\delta t$ ，此公式可得知每個同心環在每個時間單位間格中移動的角度。

所以說區塊的位置隨著時間的改變而有所變化，公式(2.5)表示區塊隨時間移動的情形：

$$\theta_{new} = \theta_{old} + \omega t \quad (2.5)$$

θ_{old} 為區塊在上一個時間單位跟起始線的夾角，而 θ_{new} 為區塊在這個時間單位跟起始線的夾角。(如果 θ_{new} 大於 360 度，則

$$\theta_{new} = \theta_{new} - 360)。$$

這個模型裡，最關鍵的地方是找出活躍區塊的鄰居。每一個區塊在不同的時間單位裡，由於盤子的旋轉，鄰居會有所改變。所以說如何在移動的中準確找出活躍區塊的鄰居，是 SSPSF 模型的重點。

由圖三可清楚看出，鄰居都分布在跟紅點同一環、上環以及下環，從這個線索，我們可以由這三部分來找鄰居。與活躍區塊同一環的鄰居是最好找的，只要知道活躍區塊的位置，跟活躍區塊上下相連的就是它的鄰居，而上下兩環的鄰居找法是相同的，我們知道活躍區塊跟起始線夾角 θ_{active} ，又知道活躍區塊跟圓心的夾角 θ_1 ，然後將上環中每個區塊跟起始線夾角 θ_{upper} 和活躍區塊的 θ_{active} 相減，如果相減後的值小於 θ_1 或 $(360 - \theta_1)$ ，則是活躍區塊的鄰居；使用相同的方法也可得到下環的鄰居。以下是用簡單的式子來表示：

$$\theta' = \theta_{upper} - \theta_{active} \quad (2.6)$$

當 $\theta' < \theta_1$ 或者 $\theta' < 360 - \theta_1$ ，則 θ_{upper} 是鄰居。

由給定的參數可知，每個區塊都有自發性機率產生恆星，而鄰近活躍區塊的有另一個誘發性機率產生恆星。為了簡化模型，假設每區塊有相同的氣體密度。區塊一旦產生恆星，氣體即被消耗而減少，要在下一個時間單位中產生恆星的機會大大減小。必須等到回復週期之後，才會回復到原來的氣體密度。在這期間，區塊的誘發性機率隨著時間增加而變大，一直回復到原來的機率。公式 (2.7) 代表著產生過恆星的區塊，其誘發性機

率的變化情形：

$$P_{st} = P_{st} \times \left(\frac{\tau_a}{\tau_r} \right) \quad (2.7)$$

其中 τ_a ：區塊在形成恆星後經歷的時間。
 τ_r ：區塊的回復週期。如果 $\tau_a > \tau_r$ 則區塊的誘發性機率維持為 P_{st} 。

3. 兩階段氣體回覆之銀河系模型：

1983 年，Comins(1983)對 SSPSF 模型做進一步的改善，將原本二維的模型發展成三維的模型，也就是說星系盤面是有厚度的，但他也沒有考慮星系核部分。在這一章節中，我們將銀河系(The Milky Way)用於 SSPSF 模型上，並進一步考慮核心部分。由於銀河系核心呈橢球狀，我們將銀心(The Bulge)部分擴展為三維模型，而銀盤(The Disk)部分還是維持二維狀態。並將氣體回覆效應使用於我們的銀河系模型上。使用氣體回覆效應的原因，是因為目前還沒有直接證據證明一雲塊裡的恆星形成作用可影響鄰近雲塊(Gallgher & Hunter 1984)。且證實星系的確會跟外來雲氣或者是跟其衛星星系作用，造成恆星形成活動，故在此考慮氣體回覆效應。

3.1 氣體回覆效應之理論：

Eggen et al. (1962)提出，銀河系由雲氣塌縮而形成，銀核和銀盤先後形成，且銀河系外圍的銀暈(halo)，在同一時間很快的均勻形成。後來 Searle 和 Zinn(1978)提出不同的看法，他們強調在銀河系的演化過程中，銀暈的形成是持續的且有週期性的演化，他們認為外圍的銀暈是藉由累積星系間氣體以及跟銀河系的衛星星系的吞食而拋出的物質所形成的。目前，我們的銀河系正在吞食

我們的鄰居---人馬座矮星系(Sagittarius dwarf galaxy)，交互作用的結果，不僅是壯大的銀河系的質量，一些沒被銀河系捕捉的物質也成了我們銀暈的一部份，這是很直接的證據證明 Searle 和 Zinn 的觀點。

Chiappini 等人在 1997 年以及 2001 年 (Chiappini et al. 1997; Chiappini 2001)，將這兩個論點合併，並提出"兩階段性氣體回覆效應"用來解釋銀河系的演化過程。氣體的回覆效應隨時間呈冪次法則分佈，第一次發生在 10^8 年左右(大約是銀河系核心剛形成時)，幾乎所有的氣體都落在核心上;而第二次則發生在 10^9 年左右(約銀河系盤面初形成時間)，大部分的氣體落在盤面上，造成盤面大量恆星形成。這樣的過程稱為"兩階段性氣體回覆效應"。

我們將銀河系分成兩部分銀核和銀盤來考慮氣體回覆效應。公式(3.1)、(3.2)表示銀核和銀盤的氣體回覆量。

$$\dot{M}_B = A \exp\left(-\frac{t}{t_B}\right), t_B = 10^8 \text{ yr} \quad (3.1)$$

$$\dot{M}_D = B \exp\left(-\frac{t}{t_D}\right), t_D = 10^9 \text{ yr} \quad (3.2)$$

其中， \dot{M}_B ：銀核的氣體回覆量； \dot{M}_D ：銀盤的氣體回覆量； t_B ：第一次氣體回覆的時間； t_D ：第二次氣體回覆的時間；A、B：常數。

設銀核和銀盤在不同時間單位的氣體累積量，和目前的銀核和銀盤的質量相等，即可算出常數 A、B 的關係式。現今銀核質量為 $10^{10} M_\odot$ ，銀盤的質量約為 $4.5 \times 10^{10} M_\odot$ (表二)，則：

$$\frac{\dot{M}_B}{\dot{M}_D} = \frac{\int \dot{M}_B dt}{\int \dot{M}_D dt} = \frac{10^{10}}{4.5 \times 10^{10}} \quad (3.3)$$

得到

$$B = 0.45 \times A \quad (3.4)$$

所以(3.1)及(3.2)式變成:

$$\dot{M}_B = A \exp\left(-\frac{t}{t_B}\right), t_B = 10^8 \text{ yr} \quad (3.5)$$

$$\dot{M}_D = 0.45 A \exp\left(-\frac{t}{t_D}\right), t_D = 10^9 \text{ yr} \quad (3.6)$$

由於氣體回覆效應，每個時間單位中星系氣體含量都不一樣。而氣體的多寡直接影響恆星形成速率，而 SSPSF 模型中，和恆星形成速率有直接影響的是誘發性機率。也就

參數	數值	參考來源
太陽距銀心之距離	$8.5 \pm 1.1 \text{ kpc}$	Allen(1991)
太陽處銀河系自轉速度	220 km/s	Kerr & Lynden-Bell(1986)
銀河系半徑	15 kpc	Gilmore et al. (1989)
銀核半徑	$1 \sim 3 \text{ kpc}$	Gilmore et al. (1989)
銀河系總質量(含暗物質)	$(1.8 \sim 3.7) \times 10^{11} M_\odot$	Hodge(1992)
銀核質量	$10^{10} M_\odot$	Frogel(1988), Bahcall(1986)
銀盤質量	$(3 \sim 6) \times 10^{10} M_\odot$	Merrifield (1992)
氫原子質量	$4 \times 10^9 M_\odot$	Gilmore et al. (1989)
氫分子質量	$\sim 3 \times 10^8 M_\odot$	Gottelman, Davies & Reddish(1966)
球狀星團個數	160 ± 20	Harris(1991)
局部恆星形成率	$(3.5 \sim 5) M_\odot / \text{pc}^3 \text{Gyr}$	Rana (1991)
整體恆星形成率	$0.35 M_\odot / \text{yr}$	Walterbos & Braun (1994)
銀心中最老的恆星年齡	$13\text{-}17 \text{ Gyr}$	Cowan, Thielmann & Truran (1991)
銀盤上最老的恆星年齡	$6 \sim 13.5 \text{ Gyr}$	Wood(1992)
金屬豐度 [Fe/H]	$\sim +0.06$	Meusinger, Reimann & Stecklum(1991)

表二：銀河系的基本參量

是說每個時間單位中，氣體含量多寡和誘發性機率是相關連的。

若銀核在每個時間單位中，氣體量為 G_B ，銀核在上一個時間單位裡整個盤面產生 K_B 個恆星，消耗氣體所形成的恆星稱"恆星效率 (star formation efficiency), 簡稱 SFE" (Δm), 則：

$$G_B(t) = G_B(t-1) + M_B \delta t - K_B \Delta m \left(\frac{G_B(t-1)}{C_B} \right) \quad (3.7)$$

其中， G_B ：銀核在時間單位之氣量； $G_B(t-1)$ ：銀核在上一個時間單位之氣體量； δt ：時間單位間隔； C_B ：銀核總區塊數。由於每區塊的氣體密度皆相同，由(3.7)式得知銀核的氣體量，則可算出每區塊的密度：

$$n_{gB} = \frac{G_B(t)}{\pi R_B^2} \quad (3.8)$$

其中， n_{gB} ：銀核中每區塊之平均氣體密度； R_B ：銀核半徑。

根據 Schmidt 定律，恆星形成速率和氣體密度平方成正比，故

$$P_{stB} = P_{st} \times (n_{gB})^2 \quad (3.9)$$

其中， P_{stB} ：銀核的誘發性機率。

同理，使用相同方法於銀盤上：

$$G_D(t) = G_D(t-1) + M_D \delta t - K_D \Delta m \left(\frac{G_D(t-1)}{C_D} \right) \quad (3.10)$$

其中， G_D ：銀盤在時間單位之氣量； $G_D(t-1)$ ：銀盤在上一個時間單位之氣體量； δt ：時間單位間隔； C_D ：銀盤總區塊數。

$$n_{gD} = \frac{G_D(t)}{\pi (R_D^2 - R_B^2)} \quad (3.11)$$

其中， n_{gD} ：銀盤中每區塊之平均氣體密度；

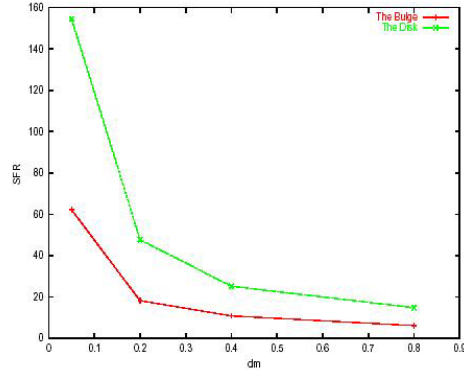
R_D ：銀盤半徑。

$$P_{stD} = P_{st} \times (n_{gD})^2 \quad (3.12)$$

其中， P_{stD} ：銀盤的誘發性機率。

3.2 產星效率的影響

由於不確定形成恆星所消耗的氣體，我們使用不同的產星效率於 SSPSF 模型上。由公式(3.7)、(3.8)、(3.9)可知，當產星效率高時，氣體變成恆星的消耗速度快，大部分的氣體都已變成恆星，則造成產星效率高時產

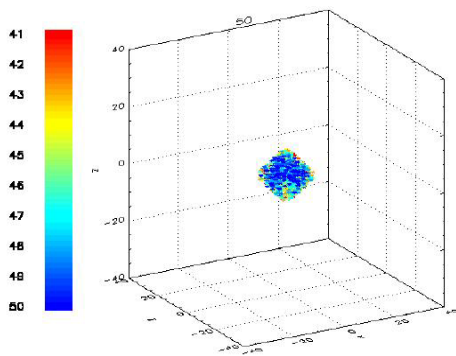


圖四：不同產星效率與恆星形成率之關係圖

生的恆星質量比氣體消耗率低時產生的恆星質量高。但是，恆星質量高並不代表產生的恆星多，由於產星效率高，每個時間單位所損失的氣體量多，氣體密度變低，產生的恆星個數卻比產星效率低時產生的恆星個數少。圖四為不同產星效率跟恆星形成率的關係，很明顯的看出，產星效率低的恆星形成率較高，而產星效率高的其恆星形成率比較低。由於核心的體積小，又是三維構造，鄰居多，所以恆星形成率比盤面高。

3.3 銀河系模型：

將已知的銀河系物理量(表二)用於建構好的 SSPSF 模型上，銀河系剛開始的幾億年之間，恆星形成的數目隨著時間的增加而變多，在 1 億年之後，恆星形成的速率漸漸穩定。此系統為一封閉系統，沒有外來的效



圖五：銀核的三維形態

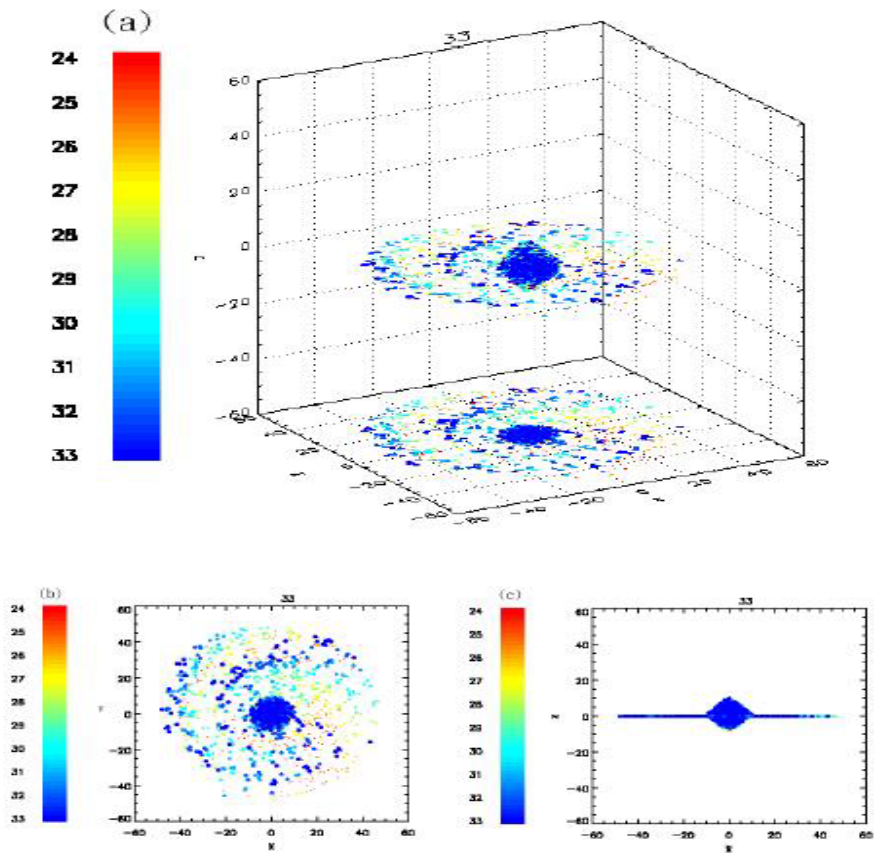
應，而且氣體的數量固定，使得恆星形成的速率是穩定的。

由表二知，銀河系半徑約為 15 kpc，而核心半徑約為 3 kpc，所以銀盤的半徑約為 12 kpc。將此距離換至我們的模型中，銀核

部分佔 10 個同心環，而銀盤部分佔 40 個同心環。由 N_1 個等厚度 (Δz) 的階層構造堆積成的銀核部分，在 r 方向盤狀階層的半徑隨著厚度的增加而減少，每相鄰階層的半徑相差一個同心環寬度，堆疊而成的銀核，則呈現一立體菱形狀結構。

三維模型的隨機恆星形成的過程都和二維模型一樣，唯一不同的是，核心部分沒有旋轉，且堆疊而成的銀核，活躍區塊的鄰居因多了上下兩層而變成原來的三倍。因此，銀核在每個時間單位中恆星形成的數目也增加了。圖五是銀核在三維的 SSPSF 模型的形態。

在完成盤面二維模型以及核心三維模型之後，將此兩模型合併，形成一完整的銀河系模型(圖四)。其中圖 4(a)是銀河系的三



圖六：銀河系在三億三千年時的形態：(a)三維形態;(b)X-Y 平面的投影;(c)X-Z 平面的投影。

參數	N	P_{st}	P_{sp}	τ_r	V (km/s)	V_l (km/s)	G(kpc)	A	Δm
數值	50	0.32	0.0002	10	220	20	15	380	20%

表三：銀河系模型參數表

維形態;圖 4(b)是銀河系在 X、Y 平面的投影而圖 4(c)則是銀河系在 X、Z 平面的投影。

4. 銀河系的核心和盤面的演化

在瞭解二階段氣體回覆效應的情況以及參數的變化後，我們以銀河系為範例，選取適當的參數模擬銀河系的演化情形。最後模擬不同光學波段下銀河系的形態，藉此跟觀測比較。

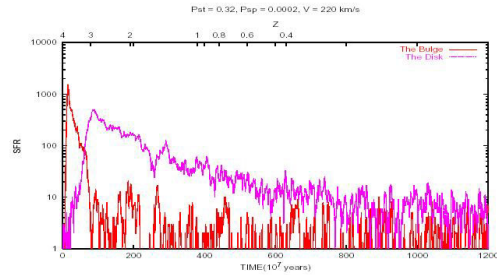
我們的銀河系屬於 S_{bc} 型螺旋星系，已知銀河系的產星效率為 20%。再將二階段性氣體回覆效應的 SSPSF 模型加入銀河系參數(表三)，便 可知道銀河系在 120 億年間的演化過程。

我們將銀核和銀盤的恆星形成率跟時間變化畫成圖七。從圖七可知，原始星雲約於 120 億年前(紅移約為 4)開始重力塌縮，於 0~10 億年間形成銀核，而銀盤開始於 10~20 億年間開始形成，在 10 億年左右時恆星形成率在銀盤達到最高峰，之後因注入的氣體變少使得恆星形成數目也變少了。

Madau 等人(1998)分析哈伯深數視場(HDF)裡的星系，他們發現紅移在 1~2 之間(圖八(a))，恆星形成率往上升、紅移 3 以後恆星形成率下降。但是卻缺少了紅移 2~3 的資料，到底這段距離間的恆星形成率情形是平坦的還是存在一極大值呢?為解釋這個問題，Madau 等人(1998)將紅外(IR)、藍光(B)以及紫外(UV)波段的觀測資料(圖八(b))，以紅移為縱軸，光度密度為橫軸畫圖，發現紅移 1~3 有一頂端出現，右上角的小圖是使用數值運算算出恆星形成速率和紅移的關係，也是看到有一頂端出現。表示說在紅移

為 1~3 間恆星形成速率達一極大值，即此時星系都處在恆星形成活躍時期。

從我們的銀河系恆星形成率與時間的關係圖裡(圖七),上方橫軸以紅移為單位，此時銀河系盤面的恆星形成率漸漸上升然後達一高峰，所以說我們的銀河系符合 Madau 他們的說法，在紅移 1~3 存在一恆星形成特別活躍時期。

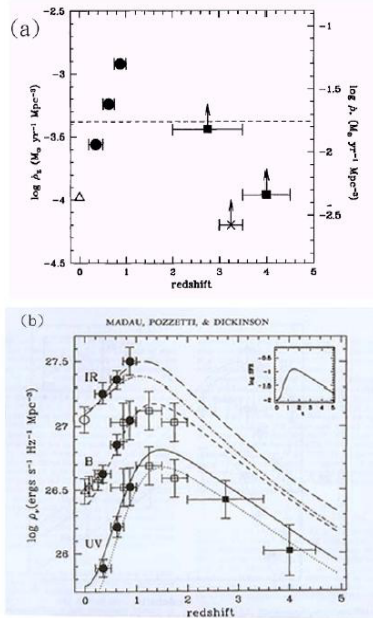


圖七：銀河系核心和盤面的恆星形成率與時間的關係。

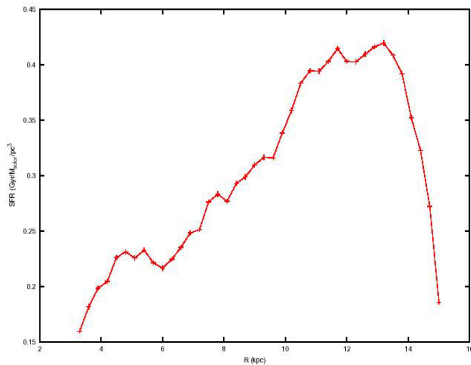
我們看看銀盤上不同位置其恆星形成率的情形。銀盤範圍在第 11 環至第 50 環之間，約為 3 kpc~15 kpc。將各個環在 120 億年間產生的恆星量，除以 120 億年即得到單位時間的恆星量，再除以區塊個數，可得知不同半徑在單位時間、單位面積的恆星形成率。先前提到，SSPSF 模型中，每顆恆星代表著真正星系中的星團，在盤面上的星團大都是疏散星團，典型的疏散星團為金牛座的畢宿星團而畢宿星團的質量約為 350 M_{\odot} (Gunn et. al., 1988)。

假設每個星團的質量皆相同，則可知道不同半徑在單位時間、單位面積中有多少質量的恆星形成(圖九)。從圖九得知，3~13 kpc 的範圍中，恆星形成率為 0.15~0.45 ($/\text{Gyr}/ M_{\odot}/\text{pc}^3$)。太陽位於銀河盤面 8.5Kpc

處，從圖 4.4 可知，太陽的平均恆星形成率約為 0.29 ($/\text{Gyr}/M_{\odot}/\text{pc}^3$)，即單位面積中每年有 0.25 個太陽質量的恆星產生。



圖八：Madau 等人(a)對 DHF 的分析 (Madau et al. 1996); (b) 不同波段的分析資料 (Madau et al. 1998)



圖九：銀核盤面上半徑跟恆星形成率的關係圖

由圖九可發現，在 13 kpc 之後，恆星形成率突然降低，是因為我們的模型中氣體只分佈至第 50 圈(即 $R = 15 \text{ Kpc}$ 處)，所以恆星形成的傳播效應，在最外面幾圈因為邊界的影響而被限制，因而恆星形成率比星系內部低。邊緣區塊的恆星除了靠內圈傳遞而誘發

形成恆星外，其他則有靠自發性機率(~ 0.0002)來產生恆星。

波段	星團年齡上限 (10^7 年)	模型的年齡上限 (1.47×10^7 年)
U	41	28
B	72	49
V	87	59
R	99	67
I	133	91
K	155	174

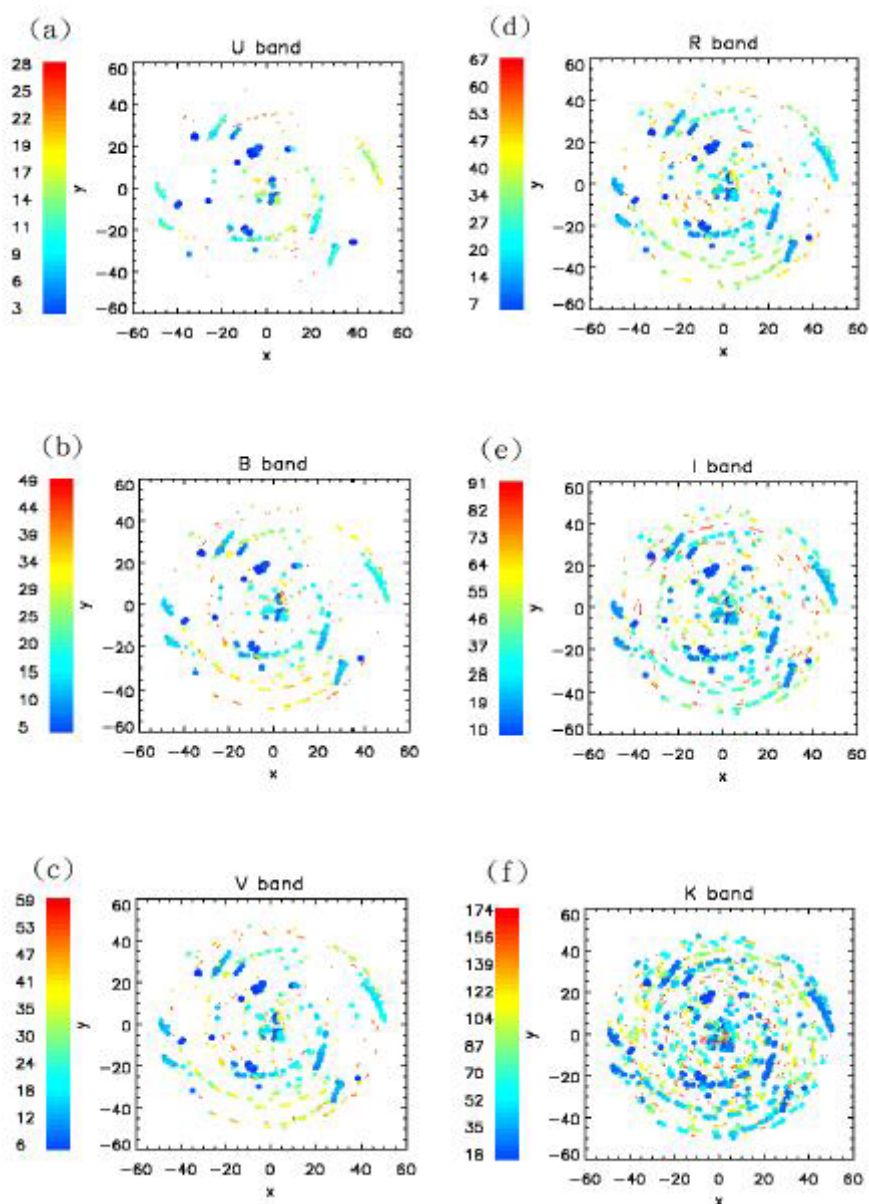
表四：多波段的星團年齡上限

SSPSF 模型的星系漩臂構造主要是由年輕恆星所主導，而年老的恆星卻被忽略了。為了考慮年老恆星所造成效應，我們用模擬方式畫出星系的光度形態，並用一顆恆星代表一個星團的光度。Struck-Marcel 和 Tinsely(1978)計算出星團的光度和年齡的關係，由於我們找不到較新的資料，在此暫用他們的計算結果。表四中第一列是各個波段，第二列是每個波段的年齡上限，而第三列則是換算成我們模型中的年齡上限。

圖十為依據表 4.2 所描繪各個不同波段下星系年齡為 120 億時的形態。由圖可知，從 U 波段到 K 波段，出現的星點由少變多。且只有最年輕以及最亮的恆星才可出現在 U 波段和 B 波段，而年齡大於 4×10^8 年的是沒辦法在這兩個波段中出現。而在紅外波段 (I 波段和 K 波段)，幾乎大部分的恆星都在這兩個波段下出現，因為對於長波長，年老的星夠亮而出現於圖中。

5. 總結：

本文主要藉由 SSPSF 模型來學習星系的演化以及恆星形成的歷史。一開始依據 Gerola 和 Seiden(1978)的論點，建立二維模型，並參考他們所使用的參數，進而希望達到跟他們一樣的結果，可模擬出明顯的螺旋星系漩臂結構。



圖十：銀河系在各波段(U,B,V,R,I,K 波段)下的形態

雖然我們形成的恆星數目沒有他們多，但是我們的螺旋星系亦有旋臂結構，且恆星是穩定成長，星系也有旋轉的趨勢，整個模型也由誘發性機率所主導。因此，我們建立的 SSPSF 型應該是有一定的可靠性。

我們希望能將 SSPSF 模型用在銀河系上，並且用來觀測銀河系的演化歷史。所以將原來的模型改建成由三維核心加上二維盤面的新模型，並加上 Chiappini(1997,2001)

所主張的"二階段性氣體回覆效應"，然後再討論恆星形成時氣體的消耗程度。我們發現，恆星產率和恆星形成率成反比，即恆星產率低的，其恆星形成率高。

所有的模型基礎建立完成後，將適合銀河系的參數(表二)代入，可看到核心和盤面的演化情形，核心先形成，然後形成盤面。我們將不同半徑的恆星形成率算出並畫成圖形(圖九)。由圖推得太陽附近的平均恆星

形成率為 $0.29 \text{ (Gyr}^{-1} \text{ M}_{\odot}/\text{pc}^3)$ 。然後使用已知的各波段的星團年齡上限模擬各波段下的銀河系形態(圖十)。

本論文所做的銀河系二階段性氣體效應裡，僅考慮星系一開始形成銀核和銀盤時的氣體效應。氣體效應開始時，恆星形成率大增，此時恆星形成由誘發性機率主導；隨時間增加，恆星形成率越來越小（因為誘發性機率變小了），整個銀河系達穩定狀態，恆星在盤面隨機形成，此時恆星形成由自發性機率所主導。由於銀河系達穩定狀態，再加上變小的誘發性機率，使得我們模型中的銀河系演化至末期，恆星產量很少。

但是，真實情況下的銀河系演化並不是如此平淡無奇，銀河系會受到其衛星星系及外圍雲氣影響，而銀河系演化過程非常複雜，可能需要許多次的氣體回覆效應，才有辦法造就出我們現在的銀河系。所以，若要改進我們的模型，使其更接近目前的觀測資料，必須再加入且更複雜的物理觀念。

想進一步的瞭解銀河系的演化情形，則要加入金屬效應。我們的模型中，一個區塊代表一顆恆星，在實際星系下代表一個星團。若要考慮金屬豐度，則要考慮星團中恆星的分佈，因為恆星的質量大小跟產生的金屬有密切關係，可能要使用到初始質量函數 (Initial Mass Function) 來估計恆星的大小分佈。如此一來，則可算出每個星團貢獻的金屬種類以及含量的多寡，進而求出星系在每個演化階段的金屬含量及分佈情形。

綜合模型基礎建立完整後，可調整模型參數，或者加入新的物理條件。若與目前銀河系觀測結果符合，則可推測銀河系的演化過程以及物理機制。

以上方法亦可用於其他星系上，若使用於鄰近星系(如 M81)，則可用 BATC 的觀測資料當作驗證以及修改模型的工具。並進一步推廣至較遙遠的星系。

藉由改進的 SSPSF 模型，雖然無法完全瞭解星系的演化情形，但可明瞭星系演化的一小部分。就如拼圖一樣，需要一小塊一小塊的拼湊才可成形。

6. 參考文獻：

- Chappini, C., Matteucci, F. & Gratton, R., *ApJ*, 477, 765, (1997)。
- Chiappini, C., *RmxAC*, 11, 171, (2001)。
- Comins, N.F., *ApJ*, 274, 595, (1983)。
- Eggen, O.J., Lynden-Bell, D. & Sandage, A.R., *ApJ*, 477, 765, (1997)。
- Gallagher, J.S. & Hunter, D.A., *ARA&A*, 22, 37, (1984)。
- Gerola, H., Seiden, P.E., *ApJ*, 223, 129, (1978)。
- Gerola, H., Seiden, P.E. & Schulman, L.S., *ApJ*, 242, 517, (1980)。
- Gunn, J.E., Griffin, R. F., Griffin, F. E. M. & Zimmerman, B.A., *AJ*, 96, 198, (1988)。
- Kong et al., *AJ*, 119, 2745, (2000)。
- Larson, R.B., *ComAp*, 6, 139, (1976)。
- Lin, C.C. & Shu, F.H., *ApJ*, 140, 646, (1967)。
- Madau, P., Pozzetti, L. & Dickinson, M., *ApJ*, 498, 106, (1998)。
- Matteucci, F. & Francois, P., *MNRAS*, 239, 885, (1989)。
- Recchi, S., Matteucci, F., Dérocle, A., *MNRAS*, 279, 447, (1996)。
- Searle, L. & Zinn, R., *ApJ*, 225, 357, (1978)。
- Statler, T., Smith, B.F. & Comins, N.F., *ApJ*, 270, 79, (1983)。
- Sreuck-Marcel C. & Tinsely, B. M., *ApJ*, 221, 562, (1978)。