

分子雲演化的二維模型

^a 陳慧真 ^b 高仲明

^a 國立中央大學天文研究所

^b 國立中央大學天文研究所、物理系、複雜系統中心

摘要

恆星多半是在分子雲群聚而生，在觀測上可看見 OB 型星的層級結構，被認為是由於 OB 型星激發了 H II 區域而向外擴張形成像「衝激波」般密度高的地方使得局部的重力不穩定產生恆星，而下一輪的恆星形成也就此展開。由此想法，我們建立了一個由「能量密度」控制的簡單模型，並將恆星簡單分為兩種型態，一為大質量恆星，生命短暫且死亡時會放出大量能量，另一為小質量星，生存時間很長但並不會提供能量給四週環境。

由結果得到，當我們給予大星及小星不同的形成機率時，最終得到的大星及小星的數目不同，而能量的演化速度也有差異。

關鍵字：分子雲、演化、模擬、能量、恆星

一、緒論

多數的恆星皆是生成於星團或星協中，而分子雲，便是恆星誕生之處。在恆星形成理論中，金氏不穩定(Jeans instabilities)被廣為採用；利用雲氣的質量及大小判別其為穩定或塌縮狀態，金氏質量(M_J)即為一個指標， $M_J \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$ ，其中 T 為溫度， ρ 為雲氣密度。當溫度越高，形成恆星所需要的質量也就越大，因此，大質量恆星在較熱（能量較高）的雲氣裡形成。

我們認為恆星形成質量與所在區域的溫度有關，意即，與其所包含的能量相關，因此，利用此種特性，我們建立了一個由「能量密度」控制恆星生長的分子雲演化模型。

所謂的「能量密度」的改變是指大質量的星形成後不久（約六百萬至千萬年）即死亡，形成超新星爆炸拋出「能量密度」，假設「能

量密度」有趨向平均的行為，則可擾動其附近的雲氣而給予形成星的機會。如此，週而復始的「形成星」、「拋出能量密度並向外擴散」、「誘發下一波的恆星形成」直到系統整體「能量密度」過高將雲氣吹散而無法形成新的星，便為形成後的星團。

二、模型與模擬

二-1 模型

假想在分子雲裡，控制恆星形成與否的關鍵為一個單一的物理量，暫稱為「能量密度」。此「能量密度」可想像為廣義的抵抗重力塌縮的能量：包括湍流(turbulence)、熱能等能量，可泛指動能。不同「能量密度」的區域產生星的機率不同。在我們的概念中，當「能量密度」

越小，雲氣塌縮所需的質量越小；因此「能量密度」小的雲氣，傾向形成小質量恆星，反之，在「能量密度」大的區域，則偏向形成大質量的星。

在本文中，我們將恆星的質量分佈簡化成大質量的星與小質量的星，此後簡稱為「大星」與「小星」。在模擬中，一個世代(t)的時間比大星壽命還長，因此，大星在表現上等於是形成瞬間便死亡並產生超新星爆炸將能量(e_{SN})丟出。小星，壽命較長，相對於模擬的時間尺度來看，形成後能量不再改變，也就是我們模擬星團中的成員星。在模型中，我們猜測「能量密度」會有趨向平均分布的行為，我們以擴散來描述這樣的行為。因此，由大星死亡產生的爆發能量將依向四週擴散。總的看來，在模型中有兩種圖樣，一為能量分布的情形，為大質量星形成及擴散的結果，可看成星雲的長像；一為小質量星分布的情形，可看成星團中成員星的分布。

上述「能量密度」的演化可以下列方程說明，

$$\frac{\partial e}{\partial t} = K\nabla^2 e + \xi(e) + Q(e) \quad (2.1)$$

其中 e 為「能量密度」。右式中，第一項為擴散行為；第二項產生大星的機率項，而產生的星會拋出能量，因此也可看成為加熱項；第三項為冷卻項，源自於能量可藉由各種方式逃離系統，如輻射、宇宙射線等。有關星雲演化、恆星形成史等課題，在文獻中有不少探討，如 Sequential star formation (Elmegreen & Lada 1977), Stochastic self-propagating star formation (Neukirch & Feitzinger 1988, Elmegreen et al. 1995, Kamaya 1998, Nomura & Kamaya 2001)，與我們的模型相關。物理中的 KPZ 方程，也與我們的方程類似。

二-2 模擬

利用在 IDL 這套軟體下撰寫的程式，我們在二維的方格點中進行模擬。能量更新部份，以下列方程描述，

$$\begin{aligned} e_{t+1}(i,j) = & \gamma [e_t(i,j)] + \frac{\alpha}{4} [e_t(i-1,j) + e_t(i,j-1) \\ & + e_t(i,j+1) + e_t(i+1,j)] \\ & + \frac{\beta}{4} [e_t(i-1,j-1) + e_t(i+1,j-1) \\ & + e_t(i-1,j+1) + e_t(i+1,j+1)] \end{aligned} \quad (2.2)$$

$e_t(i,j)$ 為「能量密度」， t 為世代； (i,j) 為所在格點。若現在的時間為 t ，下一世代的時間為 $t+1$ ，則在格點 (i,j) 處，其能量為本身能量在時間為 t 的 γ 倍加上上下左右的 α 倍及斜角的 β 倍。當 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 時，可保持能量密度守恆，如當 $\alpha + \beta + \gamma < 1$ ，則代表有能量逃逸。本文只考慮 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，因此這部份只有二個參數。

若以式(2.1)而言，對擴散項作瀰散化 (discretization)，則可由擴散係數 K 、格點相對應空間的大小 δx 、 δy 、世代相對應的時間 δt 決定 α 、 β 、 γ 三個參數。而如果考慮式(2.1)的冷卻項，則 $\alpha + \beta + \gamma < 1$ 。

而格點所在位置能否形成大星或形成小星則由當地的「能量密度」大小來決定。我們認為質量和能量相關，能量密度低處質量也低，若質量太少(能量密度低於 e_1)如褐矮星，雖然進行塌縮但尚且無法進行核融合反應，故不能稱之為星；而能量若大於某值(如 e_2)，則內部壓力太大而無法塌縮成星，而形成大星或小星的分界為 e_d 。

在邊界條件的設定方面，我們使用的是固定式的邊界條件，在邊界處固定為零值，使能量不斷由邊界散逸。

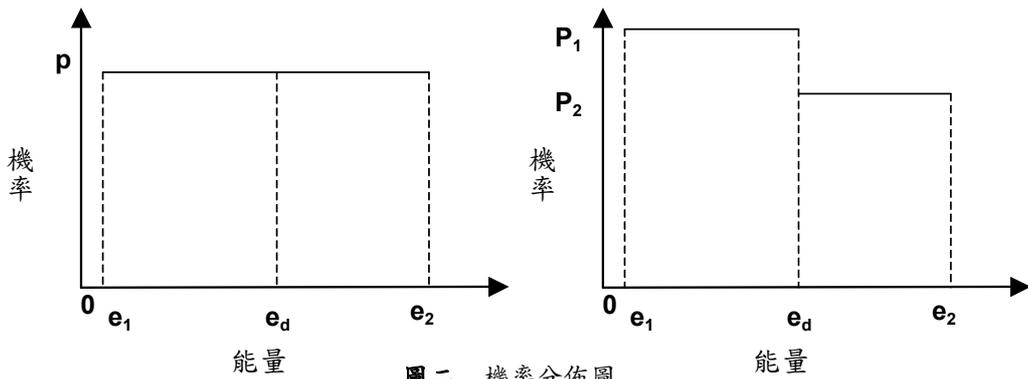
格點數	256 * 256	e_1	0.001	P_i	0.01
α	3/9	e_2	10	P_h	0.01
β	1/9	e_d	4	P_l	0.002
γ	5/9	e_{SN}	110	BC	Fixed



時間為 t 時

圖一. 擴散示意圖

時間為 t+1 時



圖二. 機率分佈圖

三、結果與分析

由於模擬結果可分為「能量密度分布」及「小質量星的空間分布」二種圖樣，因此，可就二方面分別討論。在能量密度分布部份，利用相關係數(Correlation Coefficient)及功率譜(Power Spectrum)作為分析工具。在小質量星的空間分布部份，則利用二點相關函數(Two Point Correlation Function)及最近星的距離分布(Nearest Neighbor Distribution)。

在此我們呈現其中一組結果，模擬參數如下，其中 P_i 為形成大星的初始機率， P_h 為每一世代中形成大星的機率， P_l 為每一世代中形成大星的機率，BC為邊界條件：

能量密度的分布：

在圖三(a)中，可看見許多小區域已連接在一起，而相對的(b)中的小區域也有較多連結；圖四(a)中，能量密度已連成一片，而(b)更是只見於接近0處才有值；而各圖(c)，(d)功

格點數	256 * 256
α	3/9
β	1/9
γ	5/9

e_1	0.001
e_2	10
e_d	4
e_{SN}	110

P_i	0.01
P_h	0.01
P_l	0.002
BC	Fixed

率譜的長相顯示，能量多集中在低頻處，沒有特別的結構特徵。

小質量星空間分布

圖五為小星的空間分布，一共生成了5,450顆小星，圖五(a)為空間分布長相；(b)中黑色實線為(a)的「最近星距離分布」(NND)，紅色虛線為對同星數的隨機場做NND，(b)有二數值MedC、MedR分別為模擬場與隨機場的NND的中數；(c)為距離分布與星對數的關係，黑色菱形為(a)中的模擬場所做出來，紅色三角形為同星數的隨機場所做出；(d)為二點相關函數。

圖六為模擬過程中數個量的變化，(a)為累積的大星數；(b)為累積的小星數；(c)為平均能量密度的變化；(d)為每個世代新生的大星數(黑色實線)、小星數(紅色虛線)。

三、結論

由模擬的結果，在「能量密度」分布方面，由相關係數來看，在系統內能量密度尚未高到接連成一片時，可看出空間上些微的相關(如圖三)，但由功率譜分析來看，很難判定具有結構上的特徵，能量分布多聚集在波數小的地方。

小星的空間分布方面，若要產生聚集的作用，可能需要把動力學考慮進去，因此，我們所做出的結果是與隨機場的分布相似而沒有群聚現象(如圖五)。

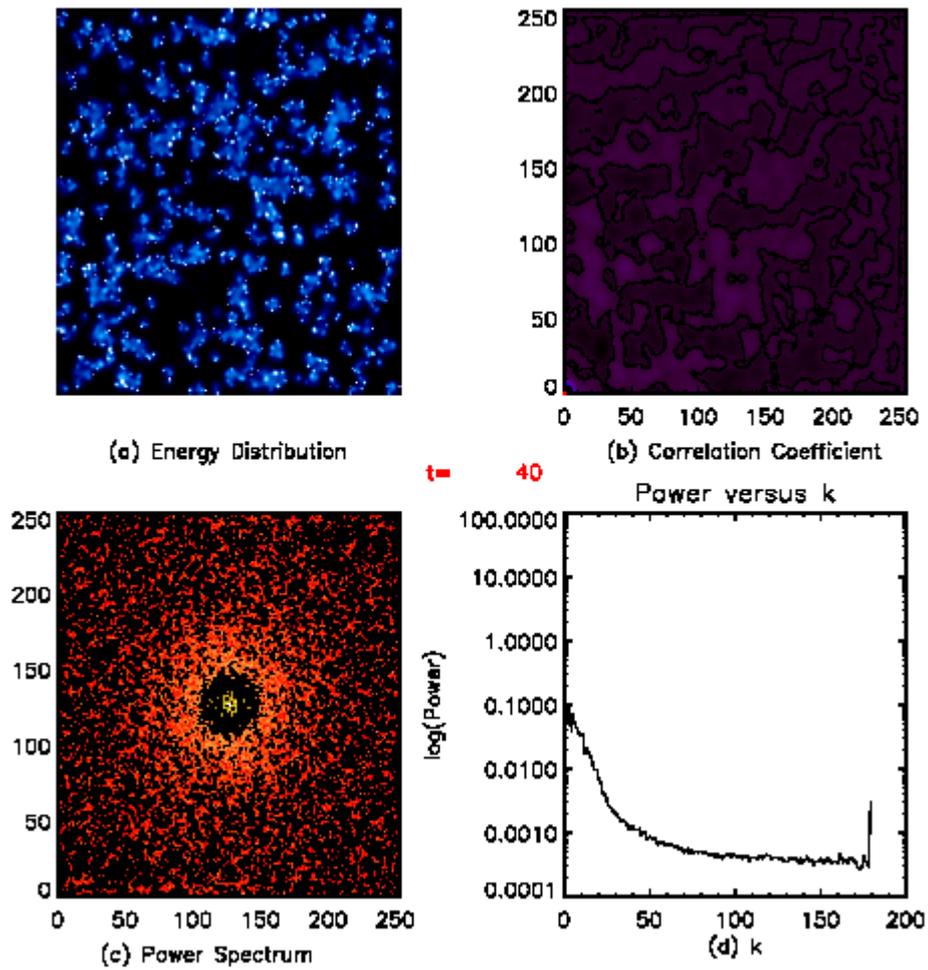
由結果顯示，大星與小星的生長曲線因其星形成機率大小而有所改變，但二者之間的關係並非十分明確，目前只找出固定其中一個形成機率而改變另一個形成機率時的趨勢。固定小星形成機率時，小星生成數會隨大星形成機率增加而減少，而大星生成數則是隨之增加(如圖七)；反之，固定大星形成機率時，小星生成數是隨小星形成機率增加而增加，而大

星則是隨之減少。

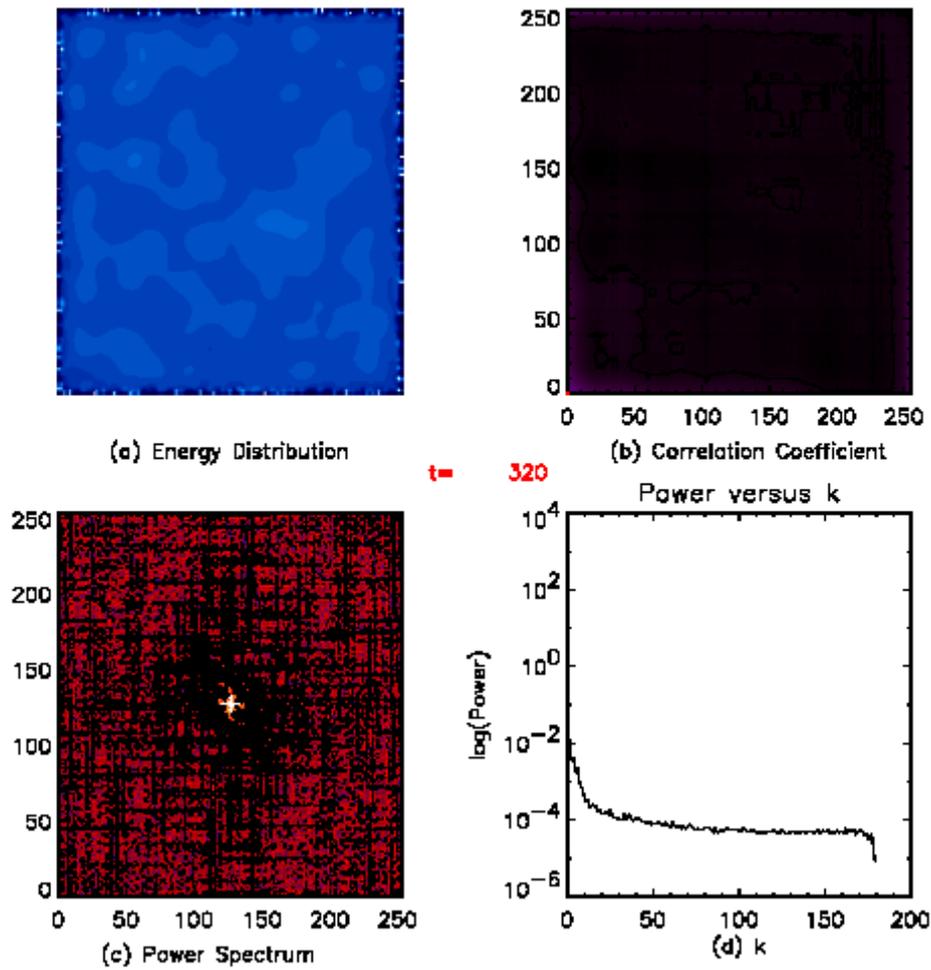
我們並試著找出星形成機率的改變與生成星數的關係，圖八和圖九為分別對改變大星/小星形成機率與生成的小星數(世代為1600)作圖。在改變大星形成機率(小星形成機率固定為0.002)時，大星形成機率越高，生成的小星數越少。而在改變小星形成機率(大星形成機率固定為0.01)時，小星形成機率越高，生成的小星數越多，並為二段連續的冪律關係。在這兩張圖中，更進一步地將初始大星形成機率 P_1 考慮進去，可發現當 P_1 不同時，其冪指數也不同。

四、參考文獻

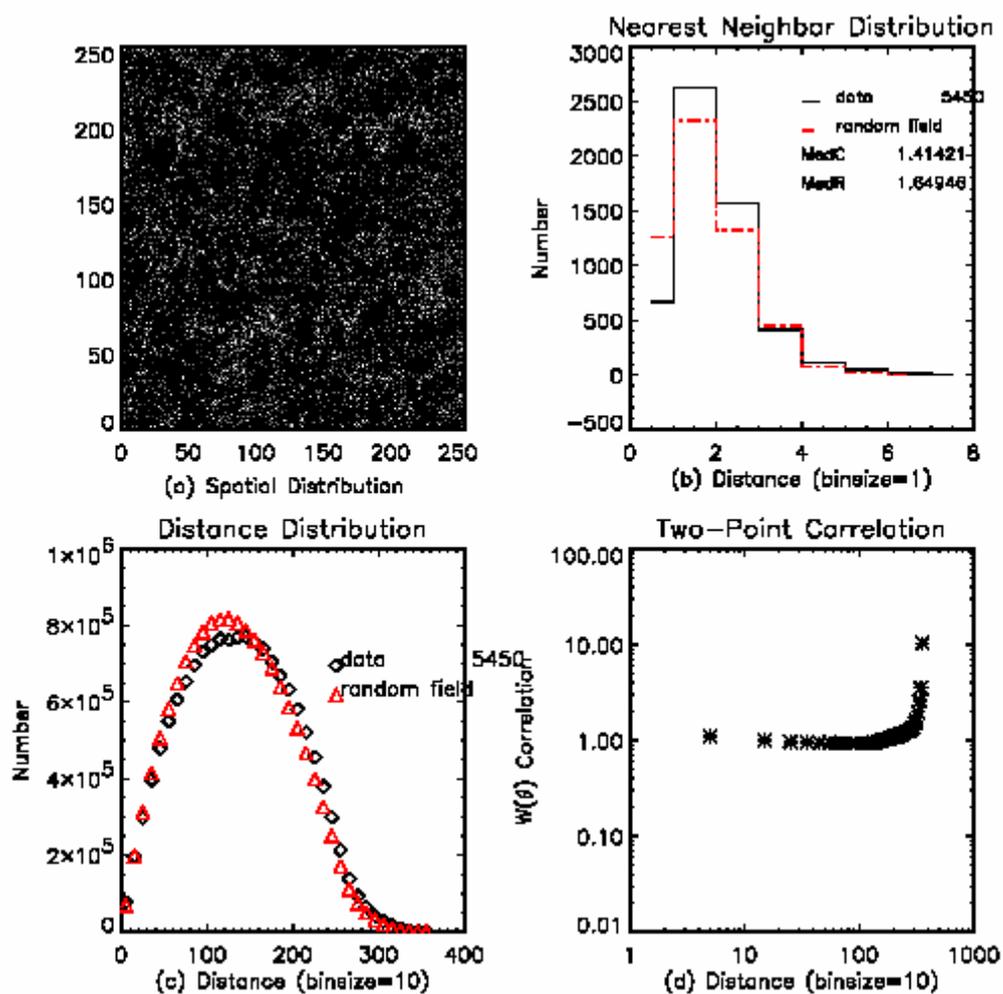
- Berera, A. & Fang, L.Z. 1994, *PRL*, 72, 458
Elmegreen, B.G. & Lada, C.J. 1977, *ApJ*, 214, 275
Elmegreen, B.G., Kimura T. & Tosa M. 1995, *ApJ*, 451, 675
Elmegreen, B.G. 1999, *ApJ*, 451, 675
Elmegreen, B.G., Kim, S. & Staveley-Smith, L. 2001, *ApJ*, 548, 749
Gomez, M., Hartmann, L., Kenyon, S.J. & Hewett, R. 1993, *AJ*, 105, 1927
Kamaya, H. 1998, *AJ*, 116, 1719
Kadar, M., Parisi, G. & Y.C. Zhang 1986, *PRL*, 56, 889
Lada, C.J. 1984, *ApJ*, 285, 141
Larson, R.B. 1981, *MNRAS*, 194, 809
Miller, G.E. & Scalo, J.M. 1979, *ApJS*, 41, 513
Neukirch, T. & Feitzinger, J.T. 1988, *MNRAS*, 235, 1343
Nomura, H. & Kamaya, H. 2001, *AJ*, 121, 1024
Spitzer, L. 1986, *Dynamical Evolution of Globular Clusters*, Princeton



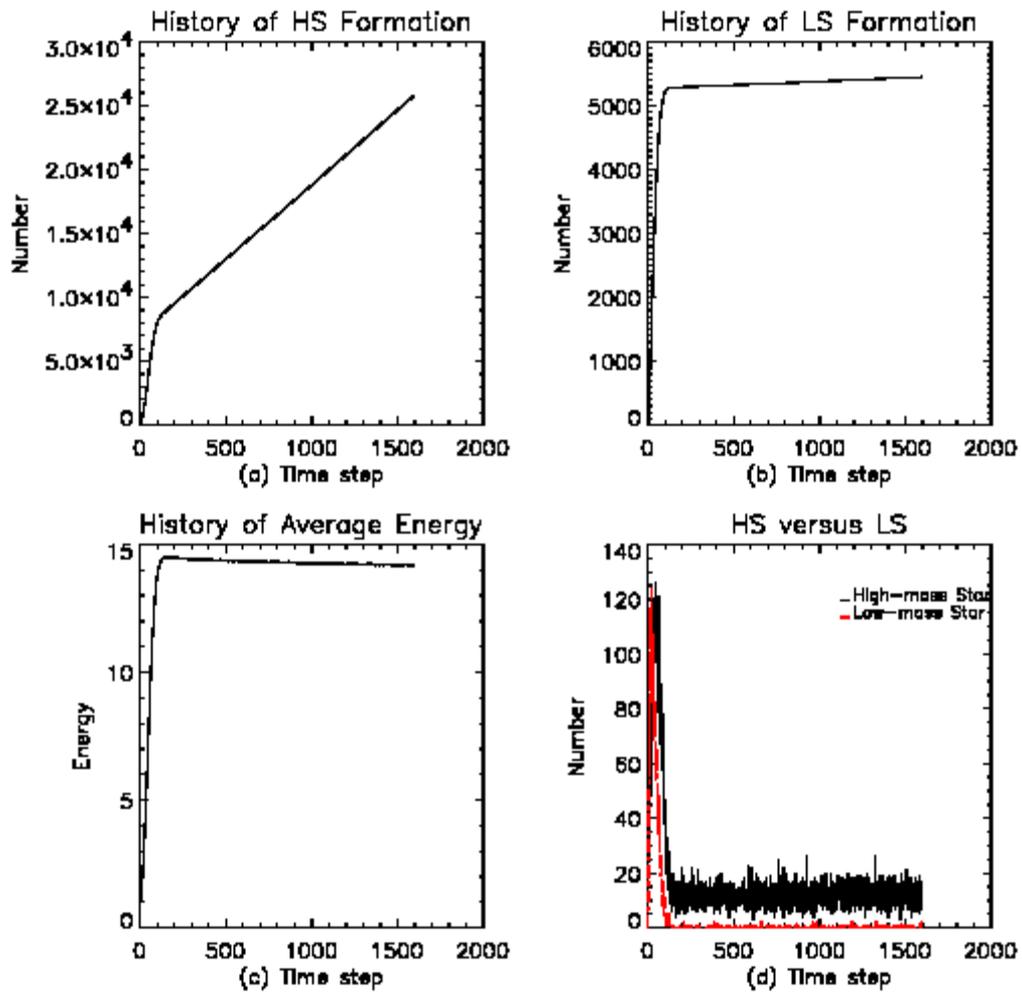
圖三. 模擬世代=40 (a)能量密度的空間分布；(b)對能量密度作相關係數的分析，可看見有一塊一塊的圖案，表示能量密度的分佈有結構性；(c) 對能量密度作功率譜的分析，頻率集中在某一區域；(d)將功率譜作對中心波數徑向的統計，可發現中心最高。



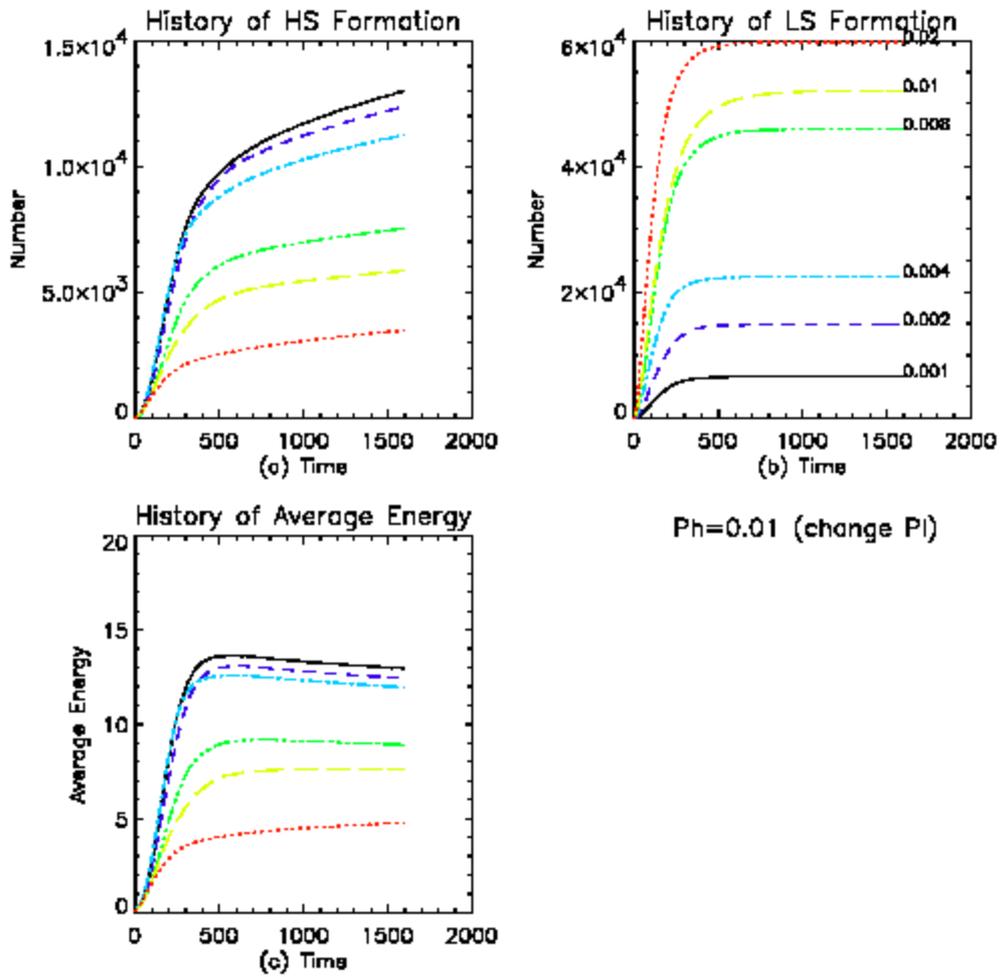
圖四. 世代=320 (a)能量密度的空間分布；(b)對能量密度作相關係數的分析，沒有特殊的圖案出現，表示能量密度的分布十分均勻；(c) 對能量密度作功率譜的分析，頻率集中在某一區域；(d)將功率譜作對中心波數徑向的統計，中心最高。



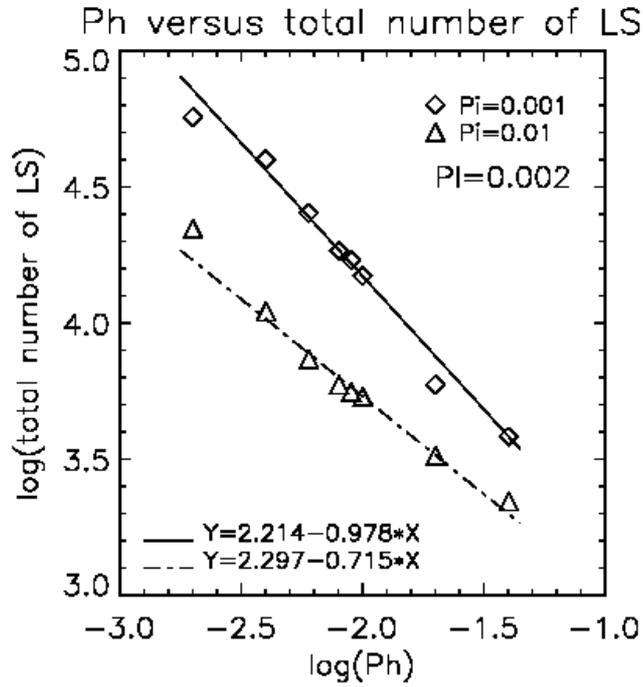
圖五. (a)小星在空間上的分布；(b)統計每一個星其最近星的距離分布；(c)每一個星對其他星的距離分布；(d) 每一個星對其他星距離的兩點相關性。



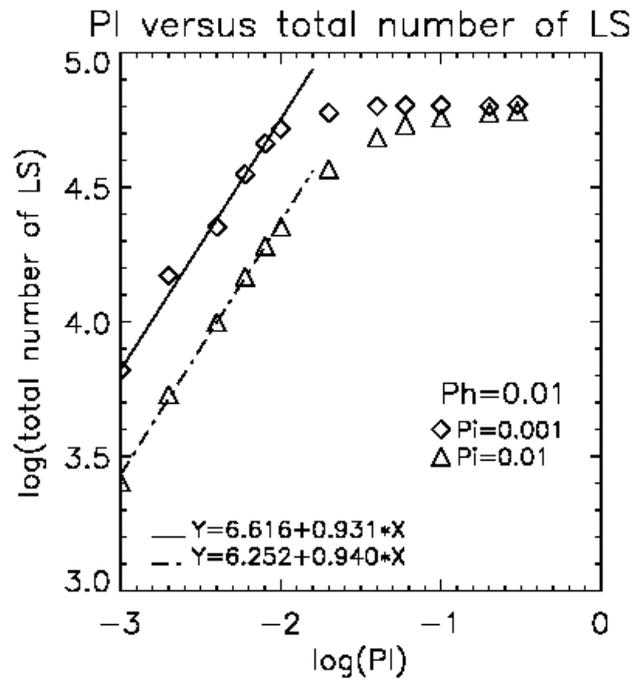
圖六. 世代=1600 (a)大星數目隨世代的演化；(b)小星數目隨世代的演化；(c)場內平均「能量密度」隨世代的演化；(d)每世代新生成星的數目比較。



圖七. 固定大星形成機率，改變小星形成機率，世代=1600。(a)大星數目的成長隨世代的演化；(b)小星數目的成長隨世代的演化；(c)場內平均「能量密度」的隨世代的變化。



圖八. 改變大星形成機率與最終生成小星數的關係， P_i 為小星形成機率， P_i 為初始大星形成機率， P_h 為大星形成機率



圖九. 改變小星形成機率與最終生成小星數的關係， P_i 為小星形成機率， P_i 為初始大星形成機率， P_h 為大星形成機率