

消散雲氣中的疏散星團

^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

星團生成於分子雲中，而根據觀測並沒有這麼多的星團存在銀河系中，因此可知其生成後的存活率很低，其原因可能來自於母雲氣消散時，整個系統的重力位能井變淺，使得恆星的動能相對過大造成逃逸。藉由 S. Aarseth 的 NBODY2 程式，我們試圖探討在消散雲氣中疏散星團的行為模式。預期中，當雲氣快速消散時，星團將會被毀滅或蒸發。然而我們發現，即使當雲氣的消散速度很大時，星團並不會被完全毀滅。

Open Clusters in a Dispersing Cloud

^a Chen Hui-Chen, ^{a,b} Ko Chung-Ming

^a Institute of Astronomy, National Central University

^b Department of Physics and Center for Complex System, National Central University

Abstract

Stellar clusters are born within giant molecular clouds. The survival rate of infant clusters is low (Lada and Lada 2003). The reason is alluded to cloud dispersion. Adopting the code NBODY2 developed by Aarseth, we study the behaviour of an open cluster in a dispersing molecular cloud. It is expected that the cluster may be destroyed or evaporated when the cloud disperses rapidly. However, we find that the cluster may not be disrupted completely even if the dispersion rate of the molecular cloud is fairly large (0.6 million years compared with respect to the lifetime of the molecular clouds, 20 to 50 million years).

關鍵字(key words)：多體運動問題、(N-body problem)、分子雲(molecular cloud)、模擬(simulation)、疏散星團(open cluster)

1. 緒論

恆星是天文學中最基本的天體之一，根據理論推測及觀測證實，在銀河系中，多數的恆星皆非獨立生成，而是生成於星團或星協中，而分子雲，便是恆星誕生之處。

星團和分子雲之間的關係，由於觀測技術的限制，天文學家們一直無法對其了解十分透徹。一般相信，恆星都是生成於星團之中，星團解散後才成為場星。由近幾年的 2MASS (the Two Micron All Sky Survey project at IPAC/Caltech) 的近紅外波段觀測資料顯示，隱藏在雲氣中的星團 (embedded clusters) 數量遠高於雲氣消散後可見光可觀測的星團數量 (Lada and Lada 2003)，因此，在星團於分子雲中形成後到雲氣完全消散這段期間，星團的死亡率很高，生存率僅為 4-7%，但造成的機制未明，早期的質量流失可能為最主要的原因 (Boily and Kroupa 2003)。因此，星團形成初期，質量流失的速度和方式即為討探此課題的重點。

2. 模型與模擬

星團生成於分子雲中，在雲氣尚未消散之前，星團深埋在雲氣當中。在星團尚未出露之前，和分子雲共存於一平衡系統中，當分子雲開始消散，系統即失去平衡。欲同時將星團和分子雲一起模擬並不容易，本文使用的是計算重力交互作用的多體運動模擬程式 NBODY2 (Aarseth, 2001) 來研究星團的動力演化，程式

中的每一顆粒子代表一顆星。我們並將分子雲看成一種星團的外位勢能，在雲氣消散之前束縛住星團。以下為本文模擬的方式。

2.1. 外位勢的形式及消散機制

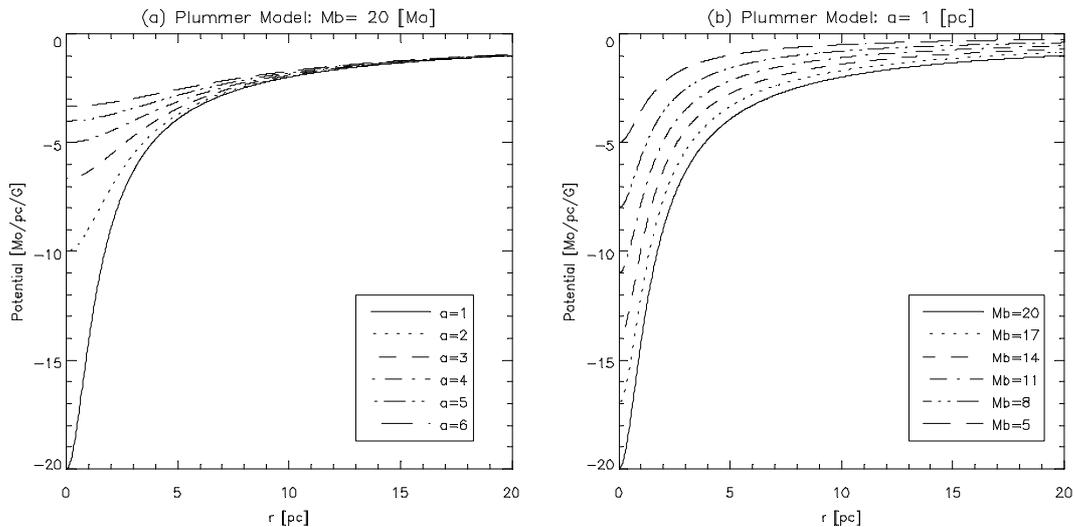
在 NBODY2 程式中，提供了 Plummer Potential (式(1)) 外位勢形式，

$$\Phi_p = \frac{-GM_b}{\sqrt{r^2 + a^2}} \quad (1)$$

其中 G 為重力常數， M_b 為 Plummer potential 的背景質量， r 為距中心的半徑， a 為外位勢的尺度大小 (length scale)。在本篇論文中，使用的便是 Plummer Potential，此外位勢的形式也最常類似的被使用。

本論文主要探討的是分子雲的擴散對星團成員星的影響，因此外位勢消散的機制及速度都會影響其結果。在 Plummer potential 中，若希望位能井變淺，可以有兩種方式，一為減少質量 M_b ，一為增加尺度大小 a ，此兩種方式不盡相同，如圖一。

我們認為，分子雲在擴散時，總質量並沒有消失，只是分佈方式較為瀰散，因此我們選擇增加 a 來表現分子雲消散的方式，如式(2)。



圖一：(a)為固定Plummer potential中的質量大小，改變其尺度大小；(b)為固定Plummer potential中的尺度大小，改變其質量大小。其中 M_\odot 為太陽質量， pc 為秒差距， G 為重力常數。

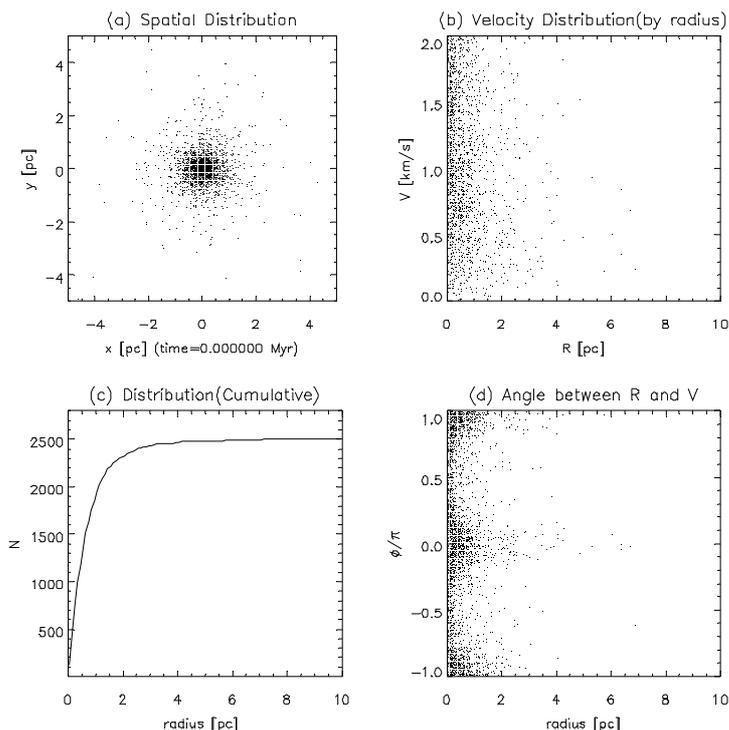
$$a = a_0 e^{\alpha t} \quad (2)$$

其中 a_0 為初始外位勢的尺度大小(單位為秒差距), α 為其膨脹速度(單位為百萬年分之一), t 為時間(單位為百萬年), a 為隨時間改變的外位勢的尺度大小(單位為秒差距)。

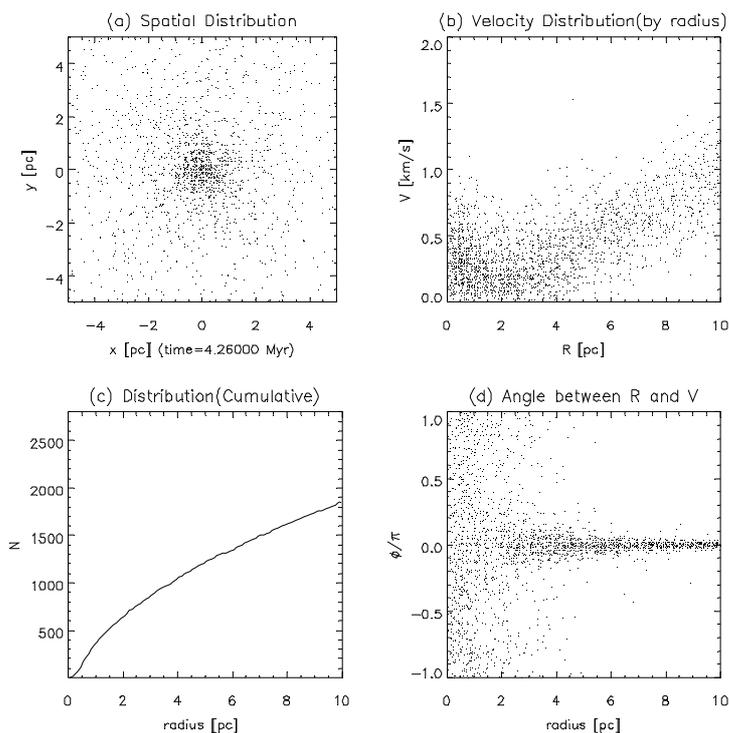
2.2. 初始條件的建立

步驟如下：

- (1) 利用 NBODY2 預設的功能，先產生一個呈 Plummer 分佈的星團，其星團的尺度大小約為 1 秒差距。
- (2) 將星團放分子雲(即外位勢)中，設定雲氣膨脹速度 $\alpha=0 \text{ Myr}^{-1}$ ，意即此時分子雲將不會隨時間改變。
- (3) 執行程式直到星團的分佈呈現類似平衡的狀態。
- (4) 利用此類似平衡狀當作初始條件，進而開始模擬 $\alpha > 0 \text{ Myr}^{-1}$ 的例子。



圖二：time=0.00百萬年(a)星團中恆星在x-y平面投影；(b)空間速度大小一半徑分佈；(c)沿半徑的個數累積分佈；(d)空間速度方向一徑向夾角分佈。



圖三：time=4.25百萬年 (a)星團中恆星在x-y平面投影；(b)空間速度大小一半徑分佈；(c)沿半徑的個數累積分佈；(d)空間速度方向一徑向夾角分佈。

2.3. 範例

在本文中所作的模

擬，皆由程式產生 2500 顆每顆一倍太陽質量的星，放至不同質量和尺度大小的分子雲之中，研究不同的消散速度對其的影響。圖二、圖三

即為一個初始質量為星團的十倍的分子雲(即 25,000 個太陽質量)，初始尺度大小 a_0 為 0.5 秒差距、 α 為 0.5 Myr^{-1} 的模擬於一開始及時間等

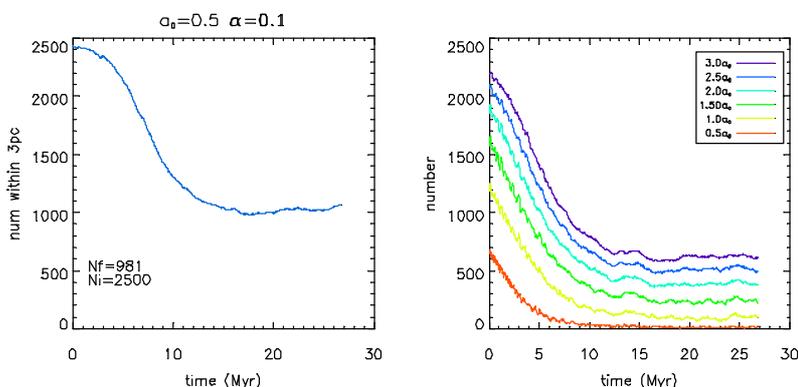
於 4.25 百萬年的結果。

其中，(a)圖為星團中恆星在 $x-y$ 平面的投影；(b)圖為其空間速度大小一半徑分佈圖；(c)圖為沿半徑的星數個數累積分佈圖；(d)圖為空間速度方向一徑向夾角分佈圖，為成員星徑向和速度方向的夾角，若接近 π 則為向星團中心移動，若接近零則表示向外移動（脫離）。圖二和圖三可明顯看出一開始和經過 4.25 百萬年後，整個星團不論是空間分佈或空間速度分佈都呈現明顯的不同。一開始，如圖二，我們看見一個在類似平衡狀態的星團，由空間分佈可明顯看出星團和背景的不同，速度分佈則顯得均勻，約百分之九十的星團成員分佈在 2 秒差距內，速度一徑向夾角在零和正負 π 和 0 處有峰值，但都介於之間徘徊。4.25 百萬年後，如圖三，空間分佈上，星團結構整個鬆散開來，

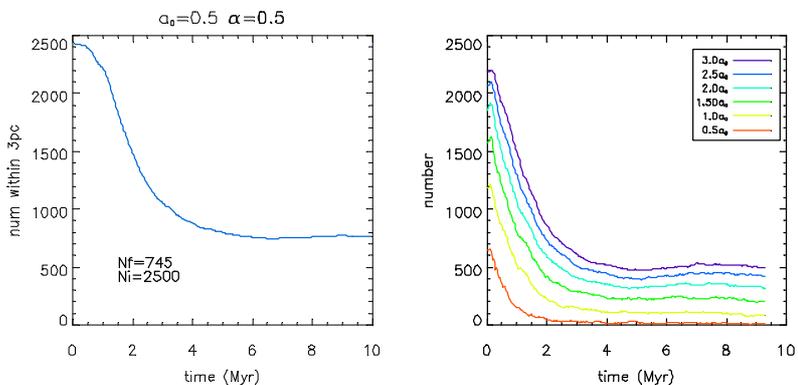
在速度分佈方面，在 2 至 3 秒差距可看見分為兩種分佈，在內的為作軌道運動的成員星，在外的則為已向外脫離的星，在 2 秒差距內也只剩下約百分之二十五的星，在速度一徑向夾角圖中更可看出有很大比例的星向外脫離。

3. 結果與分析

當分子雲的尺度大小增大，其位能井也漸漸變淺，使得原本處於類平衡狀態的成員星速度大於其平衡速度因而向外脫離，經過一段時間後，系統又會再度回復到類平衡狀態。在本文中，主要改變的參數為分子雲的的初始質量 M_b 、初始尺度大小 a_0 和消散速度 α 。圖四為 $M_b=10$ 倍星團質量、 $a_0=0.5$ pc、 $\alpha=0.1$ Myr⁻¹ 的例子，模擬的時間到雲氣開始消散後的三千萬年，我們可以看見從一開始，3 個秒差距內的



圖四： $M_b=10$ 倍星團質量、 $a_0=0.5$ pc、 $\alpha=0.1$ Myr⁻¹：左圖為 3 pc 內星數的變化；右圖為沿著不同半徑（分別為 a_0 的倍數）的星數變化。



圖五： $M_b=10$ 倍星團質量、 $a_0=0.5$ pc、 $\alpha=0.5$ Myr⁻¹：左圖為 3 pc 內星數的變化；右圖為沿著不同半徑（分別為 a_0 的倍數）的星數變化。

的星數個數一直下降，但在約一千萬年後此現象趨緩，達到一個類似平衡的狀態，因此我們可以知道在這一千萬年中，星團膨脹並失去大量的成員星，在 3 秒差距的範圍內剩下約 1000 顆星 (N_f)。圖五為 $M_b=10$ 倍星團質量、 $a_0=0.5$ pc、 $\alpha=0.5$ Myr⁻¹ 的例子，其表現與圖四類似，達到類平衡的時間更短，約為三百萬年，而 N_f （模擬停止時 3 個秒差距半徑內的星數）約為 750 顆。

因此我們可知，雲

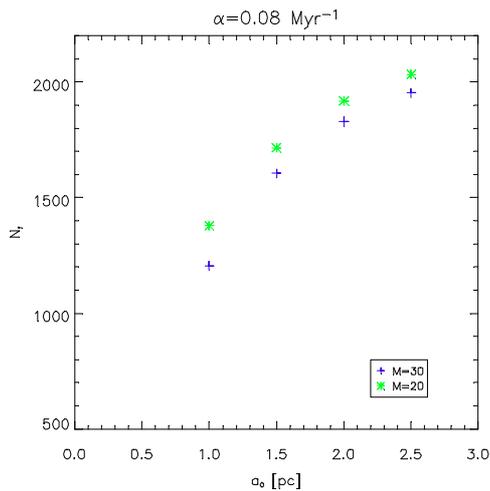


圖 (六) 固定 α , N_f 和 a_0 及 M_b 的關係。

氣的消散確實會造成部份星團成員星脫離，而多寡則取決於 M_b 、 a_0 和 α 。圖六為固定 $\alpha=0.08$ 下， N_f 和 a_0 及 M_b 的關係，我們可以看出，在分子雲初始的尺度大小 a_0 固定時，其初始質量 M_b 越大，剩餘的星數也就越多；而在同一個分子雲初始質量 M_b 下，當初始的尺度大小 a_0 越大，剩餘的星數也就越多；意即，當雲氣的擴散速度相同時，若原始的雲氣較瀰散，則可留住較多的星。而圖七為固定分子雲初始質量 M_b 下， N_f 和 a_0 及 α 的關係，由圖可知，當初始的尺度大小 a_0 越大，剩餘的星數也就越多，而在同一個初始尺度大小 a_0 下，當 α 越大，剩餘的星數也就越少；意即，除了原始的雲氣分佈較瀰散，可留住較多的星外，較低的雲氣消散速率，也可留住較多的星。

4. 討論與結論

我們試圖研究疏散星團在消散的分子雲中的行為，當分子雲消散的時候，疏散星團將會膨脹，但並不一定會完全解離。我們不但可以從空間分佈得知星團正在膨脹，還可以從空間速度分佈以及我們所定義的空間速度－徑向夾角得知。

當分子雲初始的尺度大小相同時，隨著散

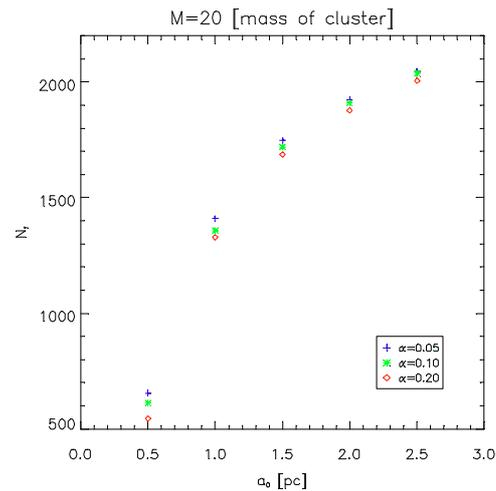


圖 (七) 固定 M_b , N_f 和 a_0 及 α 的關係。

消速度增加，最終殘留的星數會減少。在相同的消散速度下，隨著分子雲初始的尺度大小增加，最終殘留的星數也會增加；而隨著分子雲的初始質量大小增加時，最終殘留的星數也隨著減少。但即使雲氣的膨脹速度很大，星團還是不一定會完全被解離，可能保有部份的核心。

由觀測資料可知，星團、星協形成時，恆星有一初始質量函數 (Initial Mass Function, Salpeter 1955, Miller and Scalo 1979, Elmegreen 1999)，星團中具有不同質量但同一年齡的恆星，研究不同年齡的星團更可了解銀河系的演化。本文目前尚未放 IMF，但 IMF 勢必對其動力產生影響，不可忽略。而由觀察顯示，恆星形成區域的 Star formation efficiency(SFE)可達 30 至 40%，因此，調整分子雲和星團質量的比例和加入 IMF 為本研究下一步的方向。

參考文獻

Aarseth, S.J., 2001, *New Astronomy*, 6, Issue 5, 277.
 Boily, C.M. and Kroupa P., 2003, *MNRAS*, 338, Issue 3, 665
 Boily, C.M. and Kroupa P., 2003, *MNRAS*, 338, Issue 3, 673.
 Lada, C.J. and Lada, E.A., 2003, *ARA&A*, 41, 57.