

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

第三名

最佳創意獎

040508

星星相映—以理論與觀測探究雙星形成機制

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 王怡方 高二 李嘉寧	指導老師： 李美英 楊善茜
-------------------------	---------------------

關鍵詞：雙星演化、金斯不穩定、雙星間距

摘要

在銀河系中，多數恆星以雙星系統存在，因此雙星的形成機制在恆星的演化理論中扮演極重要的角色。但目前天文學界對其形成的機制未有定論，而爭論的焦點主要為兩個假說：一個假說為當分子雲在裂解為雲核時，同一雲核會形成兩顆恆星互繞；另一假說為不同雲核會分別塌縮為不同的恆星。這份研究中，我們以金斯最小質量與半徑為理論依據，找尋了上萬筆的觀測數據，並利用兩種不同的算法----週期公式與視直徑法計算出雙星間距，進而分析雙星間距的分布。結果中，我們發現前主序雙星間距分布圖出現了一個小於金斯最小半徑的峰值，經過推論我們排除了兩種方法的觀測限制可能造成的偏差，最後得出結論：分裂說必定存在，然無法排除捕獲說的存在。

壹、 研究動機

上高中以後，地球科學這門學問被正式的被獨立出來，而地科課本中的新奇內容便成了我們課餘時研究討論的對象，其中天文方面的知識更是勾起了我們無比的好奇心。我們了解到在銀河系中，大多數的恆星是以雙星系統存在而非單星，但我們發現，在恆星形成理論部分，卻只討論了單星的形成機制，因此納悶道雙星的形成機制究竟是如何？既然多數的恆星為雙星，那想必雙星形成的機制在恆星形成理論中占有很重要的地位吧！

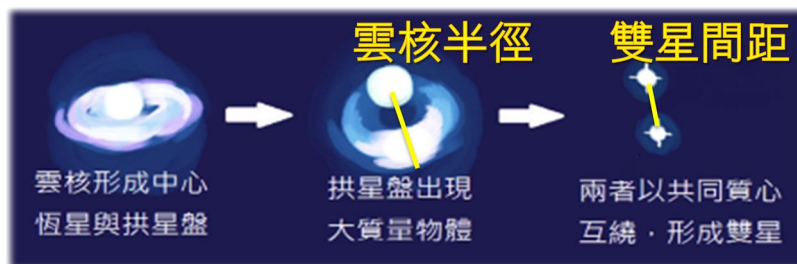
經過資料搜尋，我們發現雙星的形成機制正是目前天文學界中非常熱門的研究議題，而關於雙星的形成機制有不同的假說，然而我們發現，在許多研究論文中，大多只用了數十甚至數個雙星的觀測結果，就對雙星的演化下了定論。所以我們蒐集了大量的數據進行統計，以較可信之方式觀察雙星演化趨勢。我們希望能在不使用昂貴的天文儀器來進行研究的情況下，利用網路上人人都可取得的觀測資料以及高中物理學到的週期公式與視直徑法來取得結論，尋找可以支持假說的證據。

貳、 研究目的

目前天文學界對於雙星之形成機制有不同的假說，其中兩個最重要且最為可能的假說為分裂說和捕獲說，關於兩個假說的具體內容，分述如下：

(一) 分裂說

係指雙星來自同一雲核，分子雲塌縮時會因裂解機制產生許多雲核（雲核之最小裂解半徑應為金斯最小半徑^{*註}），雲核繼續塌縮，形成中心恆星與拱星盤。因拱星盤中出現了某些擾動，致使拱星盤產生一質量較大的物體，進而形成雙星，此形成方式是為分裂說。

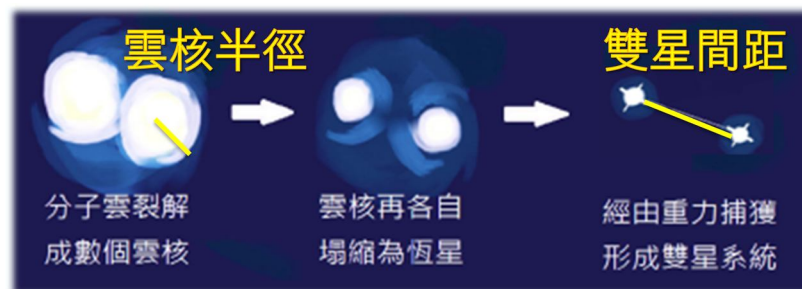


此學說成立條件：

- 前主序雙星間距 $<$ 金斯最小半徑 R_{Jmin}
由於兩顆星來自同一個雲核，因此雙星間距應小於金斯最小半徑。

(二) 捕獲說

支持雙星系統來自不同雲核。分子雲塌縮時先裂解成較小的雲核，之後不同的雲核再各自繼續塌縮成恆星，而兩個以上的恆星因為重力而開始互繞，形成雙星，此形成方式即為捕獲說。



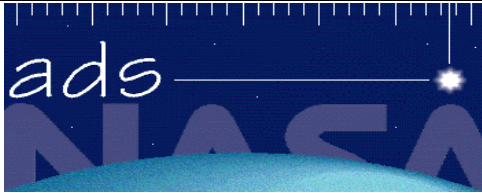





此學說成立條件：

- 前主序雙星間距 $>$ 金斯最小半徑 R_{Jmin}
由於兩顆星來自不同的雲核，因此雙星間距應大於金斯最小半徑。

我們透過理論分析，計算金斯最小半徑，作為判別分裂說與捕獲說的依據。接下來經由觀測資料分析，統計雙星之間距，找出其與兩假說的關係。希望能經由數據資料的整合分析與交叉比對，能找出雙星形成機制：分裂說或捕獲說成立的證據。

*註：見名詞解釋(頁 6)

參、 研究設備及器材

The SAO/NASA Astrophysics Data System	CDS
	
Simbad astronomical object database	Aladin sky atlas
	
Python programming language	Notepad source code editor
	

- 一、The SAO/ NASA Astrophysics Data System(搜尋引擎) — 主要含蓋範圍為天文與天體物理學，約有 920 萬條天文相關文獻，通過其檢索接口，可以快速得到大量所需的資料。
- 二、CDS(搜尋引擎) — 意指斯特拉斯堡天文數據中心，下轄各種不同形式的天文資料庫，如 Simbad、Vizie R、CDS Portal、Aladin 等等，而我們主要使用其天文數據目錄 (Catalogs)，總共包含有 10558 篇各式星表，符合我們的需求。
- 三、Simbad(搜尋引擎) — 主要是幫助使用者以不同的方法蒐尋星表，如識別查詢、坐標查詢、標準查詢、參考查詢、基本查詢。
- 四、Aladin(軟體工具) — 乃一交互式軟體天空地圖集，可連結至天文目錄或數據庫，將相關的數據輸入，使用者可以視覺化、數字化天文圖像。
- 五、Python(程式編輯器) — 為一個免費的程式編輯自由軟體，他採用的是物件導向、直譯式計算機程式語言，簡單易學，且其對於執行讀寫檔案至指定格式，有較強大的功能。
- 六、Notepad(程式編輯器) — 也是一個免費的自由軟體，他是一個可以支持多國語言的文字編輯器，十分適合用做電腦程式的編輯器。

肆、 研究過程及方法

一、文獻探討—前人對雙星形成演化機制研究之成果

對於雙星形成的理論，當今天文學界認為是一極富挑戰性的研究，對於分子雲如何塌縮，而後如何形成雙星互繞，目前尚未有定論。

1. *The Fragmentation of Cores and the Initial Binary Population* by Simon P Goodwin(et al.) (參考文獻 1)

此論文中統計了雙星間距、主星與伴星的質量比和繞行週期等等，然而其結果與雲核塌縮理論並不相符，作者推測可能是因過程中有磁場的干擾或其資料來源不甚正確造成與理論之偏差，希望等待未來的新物理或研究來解釋。

2. *Pre-main-sequence binary stars* by Robert D. Mathieu (參考文獻 4)

作者因目前對前主序帶雙星的觀測資料很少，所以做了對前主序帶性質的觀測，分別是雙星間距、伴星的質量變化和軌道離心率，進而推測雙星於前主序帶時的吸積盤運作機制，作者的結論是主序星的很多性質於前主序星時已演化完成，如繞行週期、離心率等，前主序星與主序星幾乎相同，然而其尚有一些不同之處，而不同之處便可做為雙星演化的重要解釋。

3. *Binary stars - Formation by fragmentation*

此論文比較了多種雙星形成假說，並以主序雙星之成分做為評估。而分裂說經種種檢驗，以及相關的理論與觀測討論後，被證明是最符合的雙星形成假說。

4. *Capture-formed Binaries via Encounters with Massive Protostars*

此論文旨在探討捕獲說與雙星之關係。由於拱星盤的存在普遍存在於恆星之形成過程中，過去認為擁有較大半徑的拱星盤得以與臨近恆星產生作用，進而捕獲。論文作者認為大質量恆星則較容易以此種方法形成雙星，並可解釋獵戶座星雲中大質量恆星為雙星或多星的高比例。

5. *The Multiplicity of the Hyades and Its Implications for Binary Star Formation and Evolution*

此論文使用畢宿星團數據庫所提供的雙星與多星資料做各類關於雙星之研究，其中在關於雙星形成機制中的分裂說與捕獲說之探討，作者認為該批數據與分裂說理論上之結果是一致的，但和捕獲說則是不符的。

6. *Binary statistics and star formation*

此論文之主旨在探討雙星之形成機制，作者以雙星主伴星質量比分布與運轉週期分布做研究。研究比較了四個有關雙星形成機制之假說，並討論了可能影響真實分布的各種觀測限制。其結論為許多雙星形成的方法可能同時並存。

由以上 3.~6.，我們可以得知有關雙星形成機制之研究是天文學界經常探討之問題，並且尚未有定論，這證明了此研究之重要性。

二、名詞解釋

(一) 金斯質量 (金斯不穩定性)

Jeans, J. H. (1902) *The Stability of a Spherical Nebula*

在一般物質中，向內塌縮的重力位能會與使物質向外膨脹的動能、熱能恰可抵消。然而於恆星形成的分子雲內，因為其質量太過龐大，使其熱壓力(向外)不足以抵抗引力(向內)，進而在引力的作用下發生塌縮，這一現象稱為金斯不穩定性，而使分子雲到達金斯不穩定性的臨界質量稱為金斯質量 M_J 。

(二) 分子雲裂解

Low C et al. (1976) *The minimum Jeans mass or when fragmentation must stop*

當分子雲在塌縮時，密度會增加，進而造成塌縮所需的金斯質量變小(見下式(4))，導致一正在塌縮中的分子雲會有部分地區進行各自裂解(因各部份分子雲已達其塌縮所需之金斯質量)，然而這種狀況並不會一直持續下去，因為密度增大導致塌縮所需的金斯質量變小的條件是為等溫狀態，但塌縮到一定程度後，分子雲密度不斷增加，釋出的重力位能將無法再繼續被輻射，而使系統由等溫轉為絕熱，在絕熱的塌縮過程中，溫度會增加，導致金斯質量隨著增加。所以在這兩種狀態的競爭下，會有一個分子雲裂解之最小質量，落在當崩塌狀態由等溫轉為絕熱之時。此分子雲的最小質量稱為金斯最小質量 M_{Jmin} ，分子雲的半徑為金斯最小半徑 R_{Jmin} ，也是雲核的最小半徑限制。

三、理論部分包含恆星的理論質量、理論距離和產生率以及分子雲的裂解機制。

1. 分子雲理論質量與理論半徑

(1). 依據維理定律 (Virial theorem)

當 $2K = -U$ ，分子雲會處於穩定狀態，不塌縮亦不膨脹

K 指的是動能，為分子雲向外膨脹的能量

$$K = N \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} N k T \quad (1)$$

N 為粒子總數 = $\frac{M_C}{\mu m_H}$ (m_H 為氫原子量， μ 則為分子雲之平均分子量，

M_C 為分子雲質量)， k 為波茲曼常數， T 為絕對溫度。

U 為位能，為分子雲向內壓縮之能量 (無限遠為零位面，位能為負)

$$U \approx -\frac{3GM_c^2}{5R_c} \quad (2)$$

G 為重力常數， R_c 為分子雲半徑 (假設分子雲為球型)

推導：依克赫歷程(Kelvin–Helmholtz mechanism)---分子雲或恆星收縮時的重力位能為一個接近理想同心圓的球殼與球體所產生的位能，此位能是對球殼從中心到最外層半徑積分的結果

$$U = \frac{-Gm_1m_2}{r} = -G \int_0^{R_c} \frac{4\pi r^3 \rho}{3} \frac{4\pi r^2 \rho dr}{r} = -\frac{3GM_c^2}{5R_c} \text{ 得(2)}$$

當 $2K < -U$ 時，分子雲即會崩塌

$$\begin{aligned} 3NkT &< \frac{3}{5} \frac{GM_c^2}{R_c} \\ \Rightarrow \frac{M_c kT}{\mu m_H} &< \frac{1}{5} \frac{GM_c^2}{R_c} \Rightarrow R_c < \frac{\mu m_H}{5kT} GM_c \end{aligned} \quad (3)$$

(2). 求金斯質量 M_J ：使分子雲得以開始塌縮的最小質量 M_J 必須大於 M_c ，

將 $R_c = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{M_c}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}}$ 代入(3)，得到金斯質量

$$M_J \approx \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{5kT}{G\mu m_H}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

2. 恆星理論距離—依金斯半徑推論

(1). 根據金斯質量，我們也可以計算一個密度為 ρ 的分子雲要達到塌縮時的必須半徑—金斯半徑 R_J

(2). 以 $M_J = \frac{4}{3}\rho R_J^3$ 代入(4)，得到金斯半徑 R_J

$$R_J \approx \left(\frac{15kT}{4\pi\rho G\mu m_H}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

3. 恆星產生率—依理論推算其塌縮時間

(1). 恆星必須以自由落體的方式開始塌縮，在自由落體階段，整個塌縮系統維持在等溫狀態。

(2). 經過計算，我們可以得到恆星塌縮時間，亦即自由落體時間

$$t_{ff} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

4. 分子雲的裂解

- (1). 當巨大的分子雲塌縮時，密度會增加，在等溫的情況，造成塌縮所需的金斯質量變小，導致有部分地區進行各自的塌縮(因各部份已達其塌縮所需之金斯質量)，而在各自塌縮的情況下，會造成分子雲的裂解。
- (2). 在分子雲塌縮，密度增加的同時，釋出的重力位能須一直被輻射出去才能維持等溫過程，所以當釋出的位能無法被有效的輻射出去時，整個系統會由等溫轉為絕熱。在絕熱過程中， $TV^{\gamma-1} = \text{常數} \Rightarrow T \propto \rho^{\gamma-1}$ 代入(4)，可知 $M_J \propto \rho^{(3\gamma-4)/2}$ ，所以在絕熱過程中塌縮，而金斯質量會跟著增加，與等溫狀態相反。因此可知，在塌縮的過程中，會有一個裂解之最小質量，落在當崩塌狀態由等溫轉為絕熱之時。
- (3). 我們可以計算當分子雲自由落體收縮時單位時間釋放出的能量 L_{ff} 等於黑體輻射產生的光度 L_{rad} 時的金斯質量，即為金斯最小半徑。

(4). 我們知道 $L_{ff} = \frac{\Delta E_g}{t_{ff}} \approx G^{3/2} \left(\frac{M_J}{R_J} \right)^{5/2}$ ，且 $L_{rad} = 4\pi R^2 \sigma e T^4$ ，其中 e

(efficiency) 指的是黑體輻射實際放射出的光度百分比，大於零且小於 1， σ 指的是黑體輻射中的史蒂芬—波茲曼常數。

(5). 因此當 $L_{ff} = L_{rad}$ ，我們就可以得到 $M_J^{5/2} = \left(4\pi \frac{R_J^{9/2}}{G^{3/2}} \right) \sigma e T^4$ (6)

(6). 代入數值計算後，金斯最小質量 $M_{J_{\min}} = 0.03 \left(\frac{T^{1/4}}{e^{1/2} \mu^{9/4}} \right) M_{\odot}$ ，代入(6)，

可以得到金斯最小半徑 $R_{J_{\min}} = \left(\frac{M_{J_{\min}}^{5/2} G^{3/2}}{4\pi \sigma e T^4} \right)^{2/9}$

四、研究過程

(一) 理論分析

1. 計算金斯最小質量 M_{Jmin}

步驟1. 以金斯最小質量 $M_{Jmin} = 0.03 \left(\frac{T^{1/4}}{e^{1/2} \mu^{9/4}} \right) M_{\odot}$ 計算。 $1 > e > 0$ ， μ 則

為分子雲的平均分子量，取值 1， $T = 0 \sim 3000K$

步驟2. 選擇不同的 e ，作 $M_{Jmin} - T$ 關係圖。

步驟3. 選擇不同的溫度 T ，作 $M_{Jmin} - e$ 關係圖。

步驟4. 分析我們的結果。

2. 計算金斯最小半徑 R_{Jmin}

步驟1. 選擇不同的 e ，作 $R_{Jmin} - T$ 關係圖。

步驟2. 選擇不同的溫度 T ，作 $R_{Jmin} - e$ 關係圖。

步驟3. 分析我們的結果。

(二) 觀測資料分析

統計雙星之間距與質量

在計算雙星間距時我們使用兩種算法，為週期公式與視直徑法

(1). 週期公式為 $T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{G(M+m)}}$ ，可得 $R = \sqrt[3]{\frac{G(M+m)T^2}{4\pi^2}}$

(2). 視直徑法是以自地球上觀測到的雙星視角 θ ，與地球與該雙星之距離 d ，得出雙星間距 $R = d\theta$ 。

1. 主序帶(main sequence)

- 步驟1. 利用 CDS 的星表搜尋系統，我們以關鍵字 main binary separation 或 main binary mass 搜尋相關星表。
- 步驟2. 在週期公式算法方面，我們蒐集附有「雙星繞行週期」、「雙星質量」之星表。以週期公式 $R = \sqrt[3]{\frac{G(M+m)T^2}{4\pi^2}}$ 推出雙星間距。
- 步驟3. 視直徑法部分，我們蒐集附有「雙星視直徑」之星表，再至 HIP 恆星總資料表中將所有十萬多筆的資料下載。利用 EXCEL 函數的 COUNTIF(range,criteria)和 IF(logical_test,value_if_true,value_if_false) 將含有「雙星視直徑」與「距離」的雙星選出匯至另一試算表中。以視直徑法公式 $R = d\theta$ 算出間距。
- 步驟4. 我們蒐集了數十個星表，共 10256 筆雙星間距資料，13197 筆質量資料(參見參考資料)。

2. 前主序帶(pre main sequence)

- 步驟1. 因為 CDS 中前主序星之星表數量極少，且並無包含「質量」項目者，因此我們從 ADS (天文物理數據系統) 中蒐集相關論文，取得論文內部附的星表。
- 步驟2. 我們以關鍵字 pre-main binary separation 與 mass 搜尋，閱讀論文摘要，判斷是否應選取該論文之星表。
- 步驟3. 因此方法耗時且困難，我們共選了 10 多篇論文，資料筆數約 987 筆(參見參考資料)。

將不同星表中重複觀察過的雙星刪除或再次查詢其資料

- 步驟1. 將(二)觀測資料分析中所算出的數值與其赤經緯排列於同一試算表中，利用 EXCEL 函數的 COUNTIF 和 IF 將重複的雙星資料挑出。
- 步驟2. 設合理的誤差值(重複資料時，雙星間距數值的相似程度)，並再次利用 EXCEL 函數的 IF 將雙星間距數值相差很多的雙星匯出。
- 步驟3. 至 CDS 的星表搜尋系統中，再次搜尋數值相差很多的星，並選擇觀測年代最新的資料做為我們的研究資料。
- 步驟4. 將所有資料製成表格後用 EXCEL 函數的 FREQUENCY(data_array,bins_array)計數，作主序帶與前主序帶之雙星間距分布圖(3.1)、(3.2)、(4.1)與圖(4.2)。
- 步驟5. 挑出以週期公式計算的數據，作前主序帶之雙星間距分布圖(7.1)。
- 步驟6. 挑出以視直徑法計算的數據，作前主序帶之雙星間距分布圖(7.2)。

撰寫程式將 CDS 資料庫中雙星的資料與分類下載

- 步驟1. 在 Python 程式編輯軟體中撰寫程式 `parse.py`
- 步驟2. 將(二)觀測資料分析中所有雙星的赤經緯匯入記事本並在 CDS 星表搜尋系統中匯入此記事本檔案。
- 步驟3. 將搜尋頁面存下並輸給 `parse.py` 程式。
- 步驟4. 在網頁原始碼中找出我們要的數據
- ```
soup = Soup(data)
result = soup.findAll('table', attrs={'class': 'sortable'})
```
- 步驟5. 讀取數據
- ```
tds = tr.findAll('td')
並將數據寫入輸出檔中
l = []
for column, td in zip(schema, tds):
if column is not None:
value = td.string if td.string else td.a.string
```
- 步驟6. 對於雙星的分類，我們需要一個一個至打開其星名的網頁連結
- ```
href = tds[1].a['href']
fp = urlopen(href)
取下我們要的字串
try:
trs = basic_data.find('hr').next.find('table').findAll('tr')
name = trs[1].td.font.b.nextSibling.strip(' -\n')
```

### 3. 統計不同分子雲中雙星間距分布之差異

- 步驟1. 在上述程式輸出的檔案中，選取已確定其所屬分子雲之雙星，利用 EXCEL 函數 IF、ISNUMBER(value)、SEARCHB(find\_text,within\_text,start\_num)函數搜尋星名後三字，並將屬於同分子雲之前主序雙星的挑出。
- 步驟2. 將所含雙星數大於的 5 個的分子雲挑出，並把所有資料製成表格，將其雙星間距用 FREQUENCY 計數，並繪製出雙星間距分布圖。
- 步驟3. 查詢各分子雲的資料並將之與假說比對。

### 4. 統計主序雙星總質量與間距關係

- 步驟1. 我們蒐集了同時具有主序雙星之質量與間距等性質的數個星表。
- 步驟2. 將主序雙星之總質量與間距，作主序雙星總質量—間距關係圖。
- 步驟3. 分析結果。

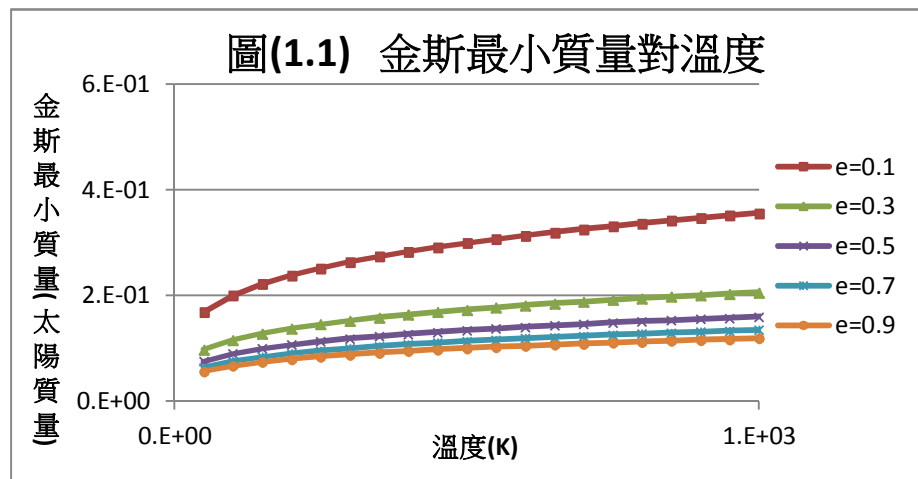
## 伍、 研究結果

### 一、理論分析

#### (一) 計算分子雲裂解的最小質量

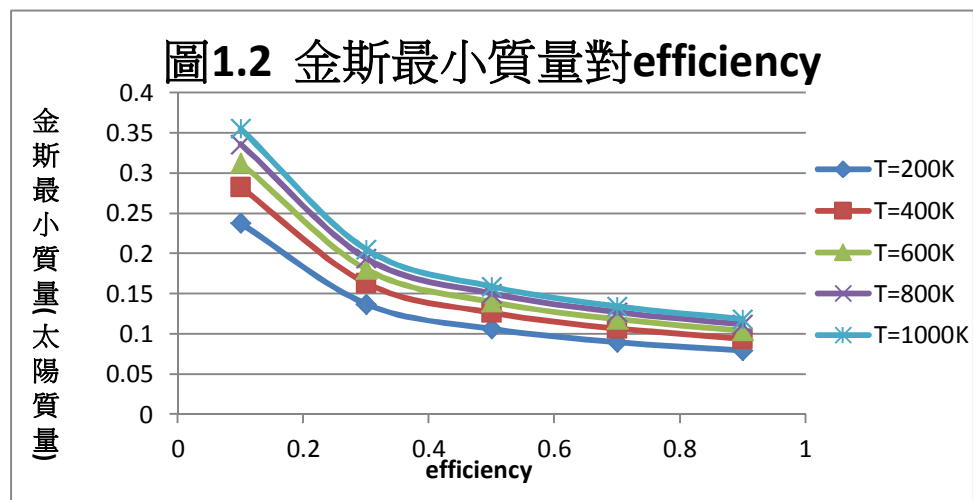
----改變溫度，觀察溫度的影響

取  $e$  分別為 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 作  $M_{J_{\min}} - T$  圖(1.1)



----改變  $e$ ，觀察  $e$  的影響

取的溫度為 200, 400, 600, 800, 1000K, 作  $M_{J_{\min}} - T$  圖(1.2)

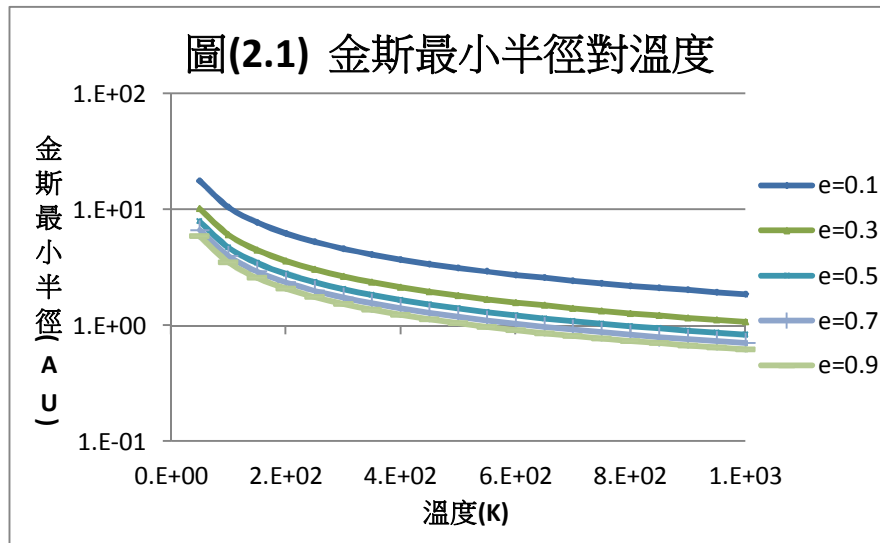


1. 由圖(1.1)可觀察到，隨著溫度的上升，金斯最小質量亦上升。但當  $e$  愈高，相同  $e$  差造成的影響愈小；由圖(1.2)可觀察到，隨著  $e$  的上升，金斯最小質量下降。但當溫度愈高，相同溫度差造成的影響愈小。
2. 由此可知隨溫度上升，金斯最小質量之變化其實很小，隨著  $e$  的變化，金斯最小質量之變化亦不大，其合理範圍為  $7.93E-02 \sim 3.56E-01 M_{\odot}$ 。

## (二) 計算金斯最小半徑

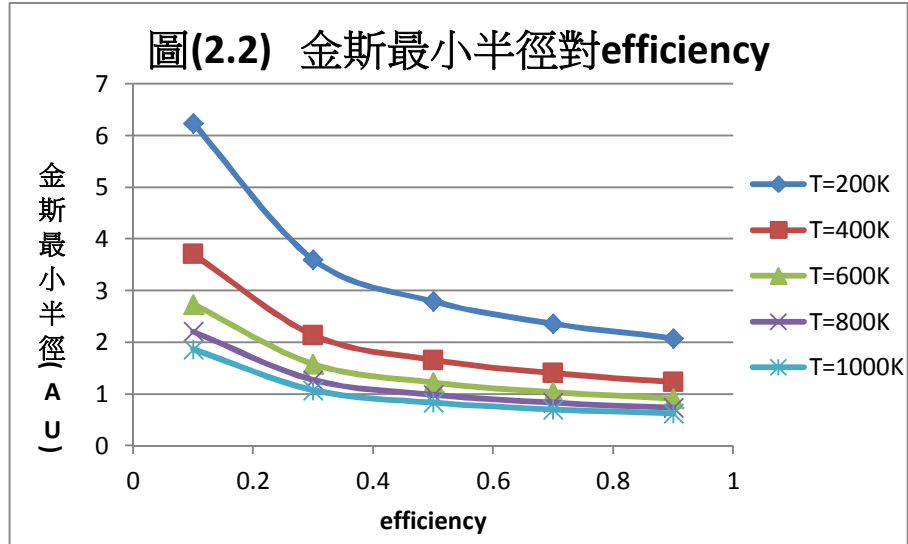
---改變溫度，觀察溫度的影響

圖(2.1)中取  $e$  值為 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 作  $R_{j_{\min}} - T$  圖



---改變  $e$ ，觀察  $e$  的影響

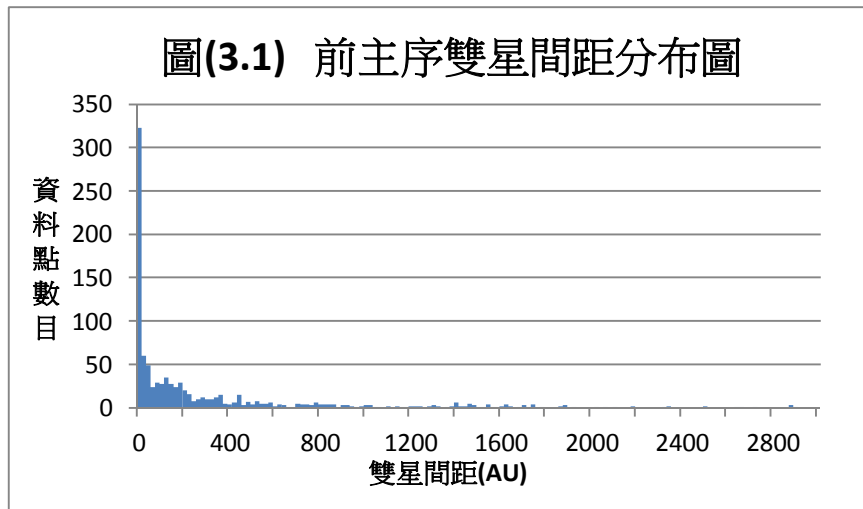
圖(2.2)取溫度為 200, 400, 600, 800, 1000K, 作  $R_{j_{\min}} - e$  圖



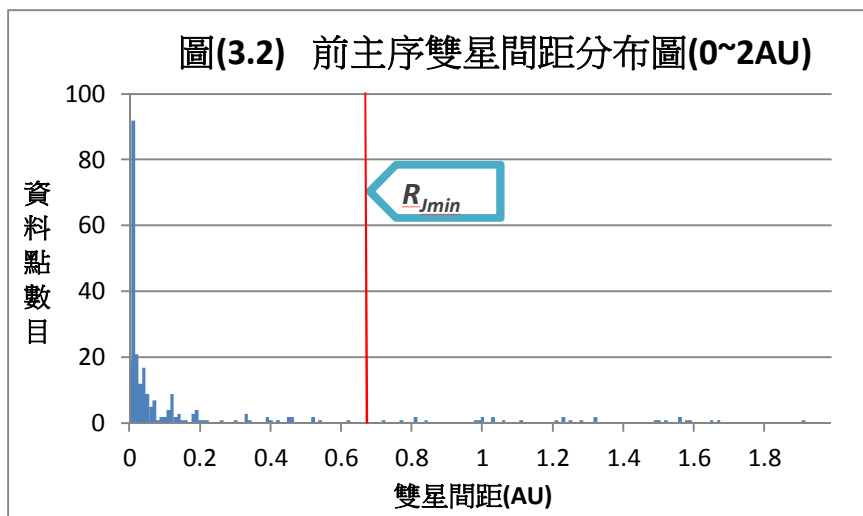
1. 由圖(2.1)可觀察到，隨著溫度的上升，金斯最小半徑下降，但當  $e$  愈高，相同  $e$  差造成的影響愈小。
2. 由圖(2.2)可觀察到，隨著  $e$  的上升，金斯最小半徑下降，但當溫度愈高，相同溫度差造成的影響愈小。
3. 由此可知，隨溫度上升，金斯最小半徑之變化亦很小，其合理範圍約為  $6.23E-01 \sim 1.77E+01$  AU，即  $R_{j_{\min}}$  約等於  $0.623 \sim 17.7$  AU

## 二、觀測資料分析

### (一) 統計前主序雙星之間距

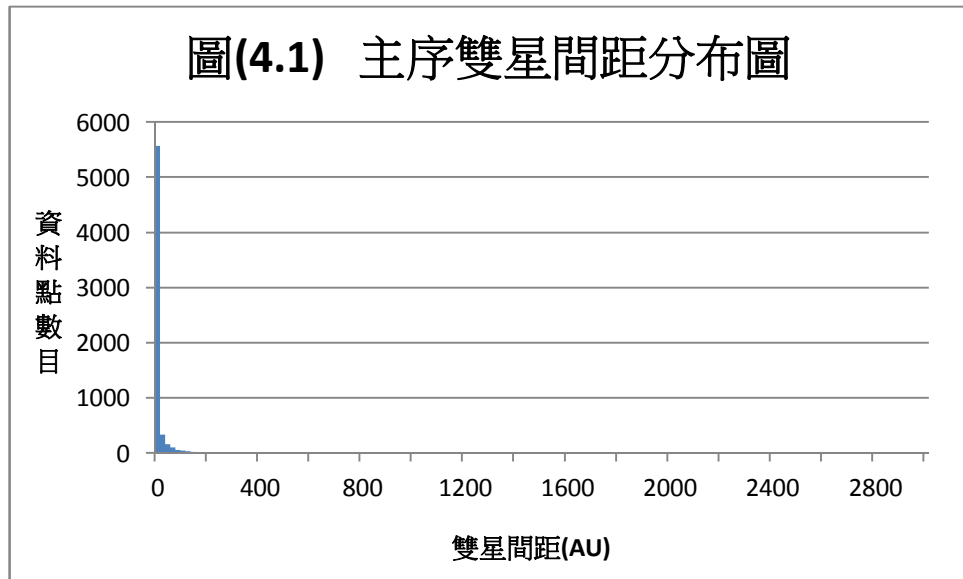


1. 圖(3.1)中，我們發現前主序雙星間距分布中，雙星間距之分布範圍十分廣，但大部分雙星集中在間距較小的區域，且峰值位在間距十分小的地方，因此我們將圖(3.1)中的較小間距(0~2AU)的資料點另外繪製為圖(3.2)。

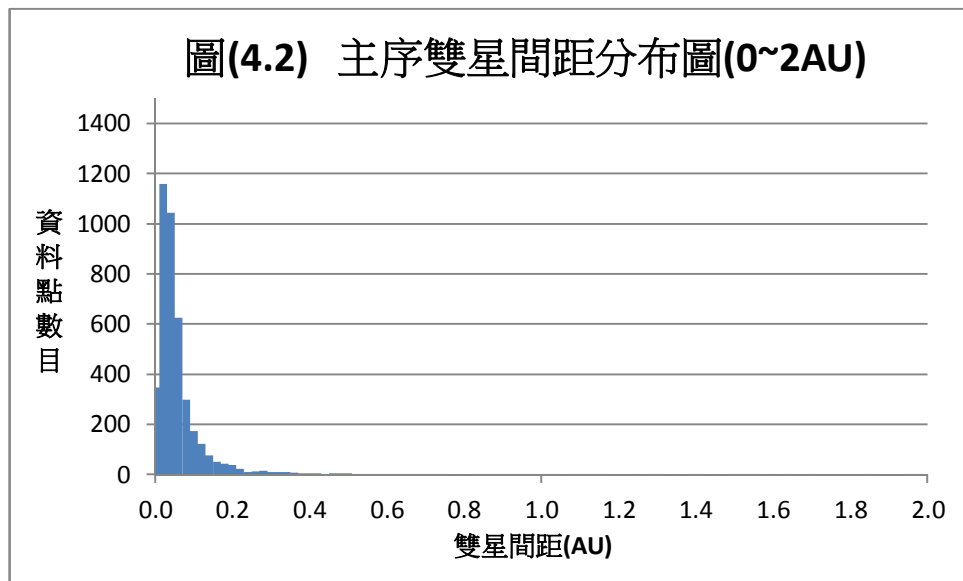


1. 由圖(3.2)，我們可得出前主序雙星間距分布的峰值位在 0.01AU 處，與金斯最小半徑比較後，峰值對應的間距小於金斯最小半徑，可推知分裂說必定存在。
2. 然而綜合圖(3.1)結果而言，間距大於金斯最小半徑之雙星也為數不小，雖然大間距的雙星也可能由分裂說形成(我們所計算的金斯最小半徑是指最小雲核的半徑，也就是說也有大於該數值的雲核半徑存在，而大的雲核經過分裂說會形成間距大的雙星)，但如此並無法排除捕獲說的存在。
3. 因此，如果我們能夠得知銀河系中分子雲核的平均半徑，便可以推知分裂說與捕獲說之存在比例，但是由於分子雲核不易觀測，現階段我們尚無法取得這方面的觀測資料並進行有關假說存在比例的推論。

(二) 統計主序雙星之間距



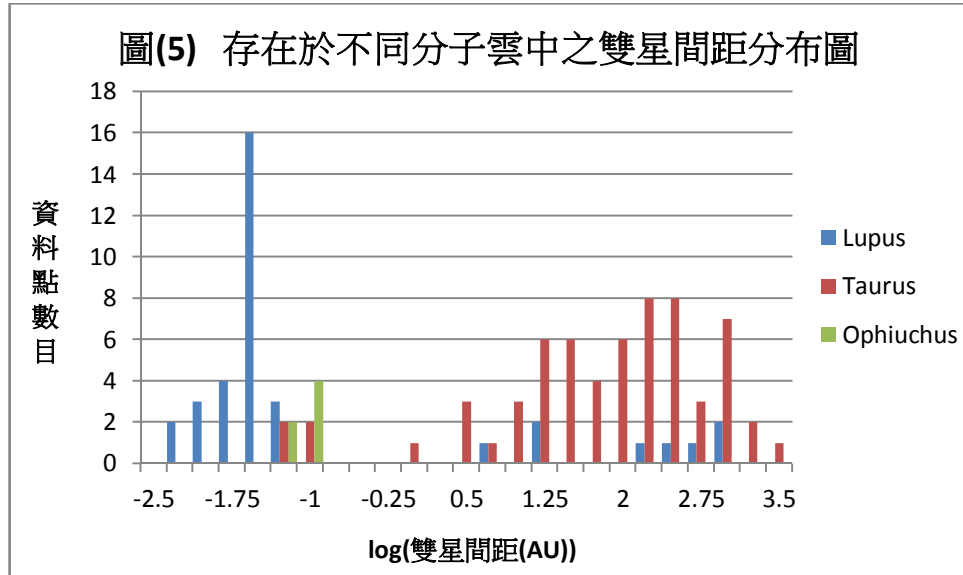
1. 圖(4.1)中，我們發現主序雙星間距分布中，雙星間距之分布範圍較前主序雙星而言較小也較集中，而峰值一樣位在間距十分小的地方。所以我們一樣將圖(4.1)中的較小間距(0~2AU)的資料點另外繪製為圖(4.2)。



1. 由圖(4.2)可得出其峰值落在 0.02AU 處，因此綜合圖(3.2)與圖(4.2)，我們可推知雙星間距在由前主序星演化到主序星期間(約兩百萬年)並沒有很大的變化，因此我們以前主序星之間距來判斷原恆星之演化並推斷假說一樣是可行的。

### (三) 統計不同分子雲中雙星間距分布之差異

我們對所有的雙星背景做調查，觀察到有許多雙星是存在同一分子雲中，而其中又以存在於分子雲 **Lupus**、**Taurus** 和 **Ophiuchus** 中之前主序雙星最多(大於五筆資料)，因此我們將這三個分子雲中的前主序雙星間距調出繪製成圖(5)。

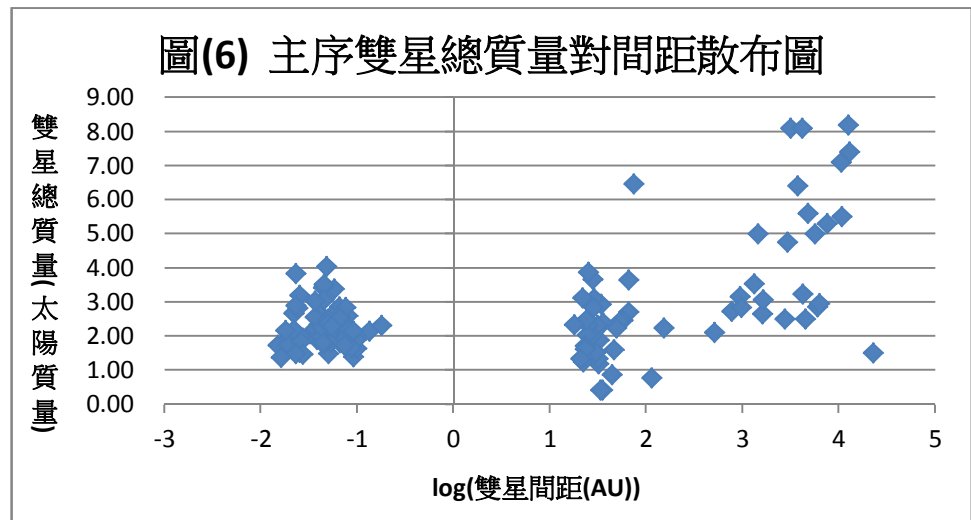


1. 由圖(5)我們可以明顯觀察到，位於 **Lupus** 和 **Ophiuchus** 中之雙星間距偏小，而在 **Taurus** 中的雙星其間距則較大。
2. 由於三個分子雲之距離相近( **Lupus**、**Taurus** 距地球約 140pc，**Ophiuchus** 距地球約 125pc )，因此可以排除視直徑法之觀測限制(討論-二)可能造成的偏差。
3. 我們推測相同分子雲中，因其形成環境相近或其他原因，使其中雙星有較類似的性質，而不同分子雲中的雙星則可能有差異，因此雙星之間距可能和其所在分子雲是有關係的，也就是說，各個分子雲中的雙星可能有共同的形成機制，而不同的分子雲之間則是有差異的。
4. 如果我們假設小間距的雙星是來自分裂說，而大間距的雙星大多來自捕獲說，則位於 **Lupus** 和 **Ophiuchus** 中之雙星即可能皆以分裂說形成，**Taurus** 中的雙星則是捕獲說。若我們對分子雲的各項資訊再加以分析比較，也許可以對不同分子雲中雙星的形成機制會有更進一步的了解。



#### (四) 以主序雙星總質量對間距做散布圖

我們也做了主序雙星之總質量對雙星間距散布圖，以期得到雙星總質量與間距之關係，進而得到支持假說之結果。



1. 圖(6)中，其實可以明顯觀察到，小間距雙星之總質量小而集中，大間距雙星之總質量則較分散。
2. 我們一樣可以觀察到，小間距之雙星其總質量亦相對較小，我們推測由於其間距較小，因此雙星質量不可過大，否則可能因重力吸引而撞毀。
3. 如果我們一樣假設小間距雙星乃由分裂說而來，而大間距雙星多來自捕獲說。則由於小間距雙星其中央恆星與拱星盤距離較近，重力關係相對較強，因此較不受外界擾動影響其質量，而大間距雙星則因由捕獲而來，兩顆星距離遠，其間重力關係較弱，較可能因為外界影響而散失或取得質量。

## 陸、 討論

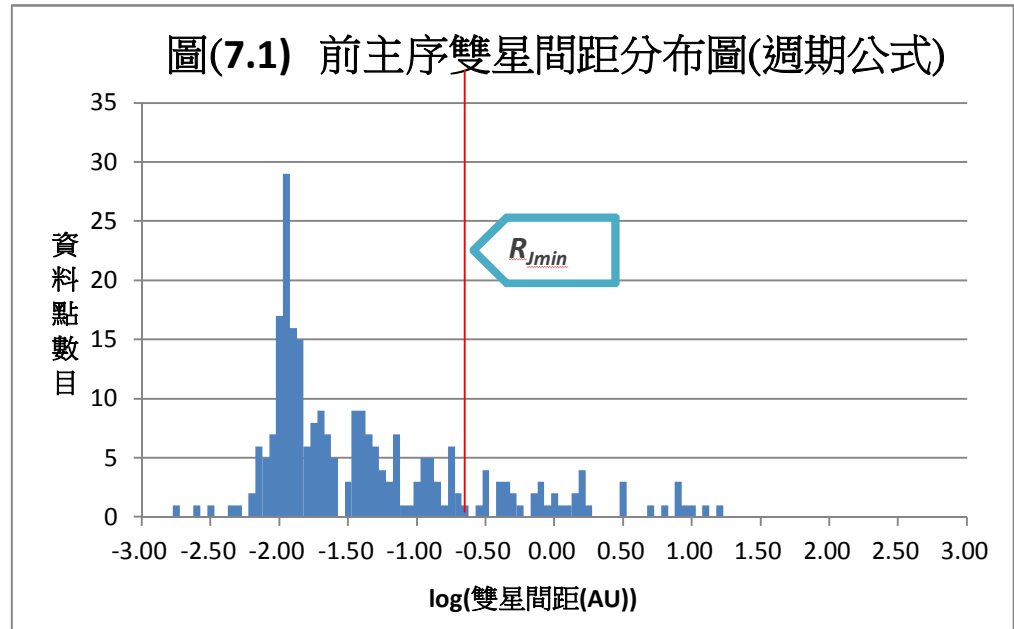
### 一、理論分析

- (一) 我們所取用的分子雲密度( $10000 / cm^3$ )與溫度來自具代表性之論文 (McCauley Patrick. et al)的數據。
- (二) 我們取的溫度為  $0 \sim 1000K$ ，當中  $0 \sim 10K$  為無電離氫區的分雲， $20 \sim 90K$  為有電離氫區的分雲， $100 \sim 120K$  為有大部分電離氫區的分雲，至於靠近恆星的區域則可高達上千  $K$ ，因此可確定我們所選取的溫度已包含所有環境的可能性。
- (三) 在計算金斯最小質量與半徑時，因為在絕熱的系統中，密度與溫度有反比關係，因此我們選擇只以溫度、 $e$  為變因。

## 二、觀測資料分析

(一) 以不同算法--週期公式與視直徑法--得出的雙星間距數據

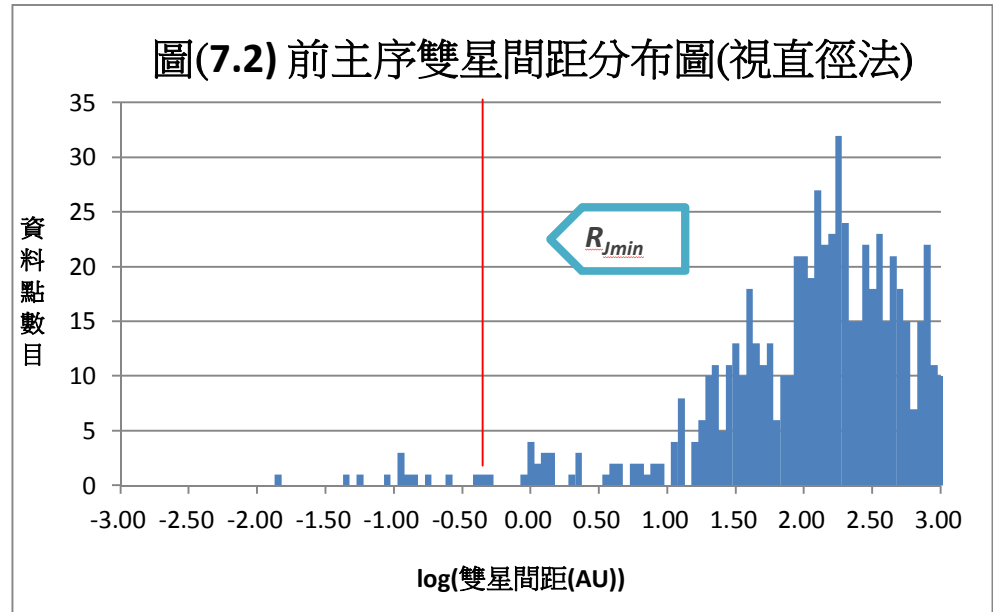
(1). 週期公式  $R = \sqrt[3]{\frac{G(M+m)T^2}{4\pi^2}}$



由圖(7.1)我們可以發現，以週期公式取得之間距皆較小。經由計算我們發現，當取雙星總質量為 2 個太陽質量時，間距為 10AU 的雙星之週期約為 20 年，如此長的週期，於觀測上十分不易，因而造成了限制，導致我們所發現的雙星間距數據皆較小。

由上述的討論，我們可以知道以週期公式取得之雙星間距是無法發現較大的數據，因為間距大之雙星通常週期較長，可能長達數百年甚至數千年，遠遠超過了人類所能觀測的時間範圍，且其繞行速度若過慢，於光譜分析時分光十分不易，導致我們無法以此種方法發現間距較大的雙星。

(2). 視直徑法  $R = d\theta$



由圖(7.2)可知，以視直徑法取得的間距數據皆較大，由於以視直徑法取得之數據需要雙星視角，也就是天文望遠鏡可以明確觀測到分開的兩顆星。以目前常用的太空望遠鏡----哈伯太空望遠鏡的鑑別角 (angular resolution) 為 0.05 角秒(arcsecond)，經由計算可知，若雙星與我們距離 20pc 時，只有間距大於 1AU 的雙星能被觀察到；若雙星與我們距離 200pc 時，則只有間距大於 10AU 的雙星能被測量，而這就是視直徑法本身的觀測限制，所以我們以視直徑法來計算雙星間距時多得到較大的數據。

由上述討論可知，間距非常小的雙星難以被天文望遠鏡直接觀測，使得無法以視直徑法取得較小間距的數據，也造成了視直徑法觀測上的限制。

(二) 存在於這兩種計算方法中之雙星間距數據

- (1). 我們曾試著取得同時存在於這兩種計算方法中之雙星間距數據，但數千筆資料中只有不到一百對雙星同時存在於這兩種計算方法中，以下僅列出部分的資料：

| 雙星赤經緯       |             | 視直徑法     |                 |            | 雙星週期公式     |            |        |            |
|-------------|-------------|----------|-----------------|------------|------------|------------|--------|------------|
| RAJ2000     | DEJ2000     | Distance | Semi-major axis | separation | Mass1      | Mass2      | Period | separation |
| "h:m:s"     | "d:m:s"     | pc       | milliarcsecond  | AU         | solar Mass | solar Mass | day    | AU         |
| 13 23 55.54 | +54 55 31.3 | 25.40    | 9.83            | 0.25       | 2.50       | 2.43       | 20.54  | 0.25       |
| 05 16 41.36 | +45 59 52.8 | 13.00    | 56.41           | 0.73       | 2.47       | 2.44       | 104.02 | 0.74       |
| 11 55 40.53 | +15 38 48.5 | 41.40    | 4.46            | 0.18       | 2.12       | 1.87       | 14.50  | 0.18       |
| 14 19 06.59 | -13 22 15.9 | 53.20    | 19.76           | 1.05       | 1.90       | 1.72       | 206.73 | 1.05       |
| 21 35 19.12 | +28 11 51.4 | 73.40    | 2.03            | 0.15       | 1.56       | 1.39       | 12.21  | 0.15       |

比較這些雙星後，我們發現兩種計算方法並不會造成雙星間距的差異，因此我們更可肯定我們雙星間距計算方法無誤。

- (三) 如上討論二、(一)所言，由於我們所使用的研究方法，可能因為一些無法避免的問題而有所偏差，週期公式與視直徑法都各自存在觀測限制，導致我們以這兩種方法取得了不同的結果。並且因為兩種計算方法的觀測限制分別存在大間距和小間距的雙星，致使我們無法確定兩種限制交集處的雙星間距實際分布情況。

我們曾經懷疑這些觀測限制所造成的影響會使我們所取得的數據與分析出的結果並不正確，但經檢驗後，我們選擇排除上述想法：

1. 圖(7.1)中峰值的右側與圖(7.2)中峰值的左側，資料點數目下降得都很急遽，如此大幅度的減少不像是由觀測限制所造成
2. 圖(7.1)中， $\log(\text{雙星間距(AU)})$  為-1.5~-0.5 處，資料點數目已非常少，但該處雙星之週期只有一幾小時至數天，不應是週期公式的觀測限制範圍。
3. 同理，在大間距雙星的部分，有許多雙星其間距已大到能為望遠鏡所見，故不應是視直徑法的觀測限制造成較少的資料點數目，而是該處真的只有較少雙星存在。

- (四) 另外我們認為前人的許多研究僅以數十筆資料分析，所得出的結果也不盡相同，因此我們以數百甚至數千筆資料進行研究，並且在選取資料時以整合分析(Meta analysis)的方式進行統計。整合分析指的是指將多個研究結果組合進而進行統計，由於每個研究的本質與其本身所擁有的誤差都不同，經由大量的數據統計，我們即可將這些異質性隨機化。

總之，經過我們的種種推論，我們認為以兩種計算方法算出的雙星間距都是確實存在且正確的，因此分析雙星間距時必須同時採信兩種計算方法呈現出來的結果，而不能因其中一種方法所存在的限制就捨棄以該種方法取得之結果，才能夠得出正確結論。

## 柒、 結論

### 一、理論分析

我們選取  $e = 0 \sim 1$ ， $T = 0 \sim 1000K$ ，可得金斯最小質量  $M_{J_{\min}} = 0.079 \sim 0.356 M_{\odot}$ ，金斯最小半徑  $R_{J_{\min}} = 0.623 \sim 17.7AU$ 。

### 二、觀測資料分析

- (一) 於前主序雙星間距分布中可知雙星間距分布範圍十分廣，但大部分雙星集中在間距較小的區域。
- (二) 我們發現以視直徑法取得之雙星間距均較大，而以週期公式取得之雙星間距均較小，而這是因為兩種方法各自的觀測限制之故。
- (三) 在不同分子雲中，我們發現雙星間距分布有不小的差異，或許相同分子雲中因其形成環境相近等原因，使其中雙星有較類似的性質、不同分子雲中的雙星則可能有差異，因此雙星之間距可能和其所在分子雲是有關係的。
- (四) 由主序雙星質量對間距的關係，我們發現隨著雙星間距愈來愈大，雙星之總質量有越來越分散的趨勢，這是由於小間距雙星由分裂說而來，由於其中央恆星與拱星盤距離較近，重力關係相對較強，質量較不受影響；大間距雙星因間距大，重力關係較弱，較可能散失或取得質量。
- (五) 將前主序雙星間距分布圖中的峰值與金斯最小半徑比較後，峰值小於金斯最小半徑，推知分裂說必定存在，不過如此並無法排除捕獲說的存在。

經過種種分析，我們認為以兩種計算方法算出的雙星間距都是正確的，因此分析雙星間距時須同時採信兩種計算方法的結果，而不能因其中的限制就捨棄該方法，才能得出正確的結論。在研究中，我們得出分裂說必定存在，並且若得知分子雲核之平均大小後，可判定捕獲說存在的可能性。希望可以以我們蒐集的大量觀測資料與高中生能進行的研究方式，為這個天文學界爭論不歇的問題提供有力的佐證。

### 未來展望

1. 我們目前已證實分裂說確定存在，希望未來能找到更多證據證明兩假說並存，並試著探討兩假說存在的比例。
2. 如果我們能夠得知分子雲核的平均半徑，我們便可以推知分裂說存在之大概範圍，並推論兩假說之存在比例。
3. 希望能取得更多分子雲的各項資訊，加以分析比較，也許可以對不同分子雲中雙星的形成機制會有更進一步的了解。
4. 目前雙星形成的假說尚未有定論，我們希望能以網路上找到的上萬筆數據，而非使用昂貴的儀器，來探討這個問題。

## 捌、 參考文獻及其它

### (一) 數據來源

我們在 ADS 與 CDS Catalogs 蒐集到的各種參考資料來源如下：

圖(7.2)—以視直徑法取得之前主序雙星間距分布

| 論文名稱                                                                                                        | 年分   | 作者               | 資料數 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------|-----|
| Faint companions around YSOs in TMC                                                                         | 2008 | Itoh et al.      | 55  |
| A survey of stellar families: multiplicity of solar-type star                                               | 2010 | Raghavan et al.  | 12  |
| Visual binary among pre-main sequence stars                                                                 | 1993 | Reipurth et al.  | 84  |
| Hubble space telescope/Nicmos imaging survey of the Ophiuchus cluster                                       | 2002 | Allen et al.     | 8   |
| The multiplicity of pre-main sequence stars in southern star-forming regions                                | 1997 | Ghez et al.      | 29  |
| Binary stars in the Orion Nebula Cluster                                                                    | 2006 | Koehler et al.   | 13  |
| Visual binaries in the Orion Nebula Cluster                                                                 | 2007 | Reipurth et al.  | 91  |
| Primordial circumstellar disks in binary systems                                                            | 2009 | Cieza et al.     | 125 |
| Fundamental properties of pre-main sequence stars in young, southern star forming regions: metallicities    | 2006 | D.J.James et al. | 14  |
| Physical properties of 90 AU to 250 AU pre-main-sequence binaries                                           | 1997 | Brandner et al.  | 15  |
| Observational constraints on the formation and evolution of binary stars                                    | 2001 | White et al.     | 92  |
| Hunting for millimeter flares from magnetic reconnection in pre-main sequence spectroscopic binaries        | 2011 | Kóspál et al.    | 14  |
| Rotation periods of Post-T Tauri stars in Lindroos systems                                                  | 2004 | Huélamo1 et al.  | 18  |
| Measuring the mass of a pre-main sequence binary star through the orbits of TWA 5A                          | 2007 | Konopacky et al. | 1   |
| Disc orientations in pre-main-sequence multiple systems: A study in southern star formation regions         | 1998 | Monin et al.     | 23  |
| FU ORIONIS: A BINARY STAR                                                                                   | 2003 | Hongchi et al.   | 1   |
| A NEAR-INFRARED MULTIPLICITY SURVEY OF CLASS I/FLAT-SPECTRUM SYSTEMS                                        | 2009 | Haisch et al.    | 19  |
| DISCOVERY OF A YOUNG SUBSTELLAR COMPANION IN CHAMAELEON                                                     | 1997 | Luhman et al.    | 1   |
| RESOLVING A CLASS I PROTOSTAR BINARY SYSTEM WITH CHANDRA                                                    | 1998 | Hamaguchi et al. | 3   |
| PRIMORDIAL CIRCUMSTELLAR DISKS IN BINARY SYSTEMS: EVIDENCE FOR REDUCED LIFETIMES                            | 2006 | Cieza et al.     | 3   |
| HST/NICMOS2 coronagraphic observations of the circumstellar environment                                     | 2007 | Augereau et al.  | 1   |
| Binaries, outflows, and disc structure down to AU scales                                                    | 1999 | Takami et al.    | 6   |
| A connection between submillimeter continuum flux and separation in young binaries A129-32                  | 1996 | Jensen et al.    | 9   |
| The Connection between Submillimeter Continuum Flux and Binary Separation in Young Binaries                 | 1998 | Mathieu et al.   | 25  |
| HDE 245059: A weak-lined T Tauri binary revealed by Chandra and Keck                                        | 2001 | Baldovin et al.  | 1   |
| Multiplicity among T Tauri stars in OB and T associations. Implications for binary star formation AAV307121 | 1966 | Brandner et al.  | 27  |
| A search of close binaries in the Ophiuchi star-forming region                                              | 2000 | Barsony et al.   | 55  |
| A SPECTROSCOPIC SURVEY OF SUBARCSECOND BINARIES IN THE TAURUS-AURIGA DARK CLOUD                             | 2002 | Hartigan et al.  | 34  |
| IMAGING THE CIRCUMSTELLAR ENVIRONMENTS OF YOUNG BINARIES                                                    | 2002 | Koresko et al.   | 10  |
| ASTROPHYSICS OF YOUNG STAR BINARIES                                                                         | 1995 | L.Prato et al.   | 16  |
| Search for low-mass PMS companions around X-ray selected late B stars                                       | 1998 | Hubrig et al.    | 22  |
| Pre-main sequence binaries                                                                                  | 2001 | Hans             | 7   |
| The multiplicity of T Tauri stars in the star forming regions Taurus-Aurigs and Ophiuchus-scorpius          | 1993 | Ghez             | 32  |

圖(7.1)一以週期公式取得之前主序雙星間距分布

| 論文名稱                                                                                                        | 年分   | 作者               | 資料數 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------|-----|
| Multiplicity among T Tauri stars in OB and T associations. Implications for binary star formation AAV307121 | 1966 | Brandner et al.  | 27  |
| The discovery of six pre-main-sequence spectroscopic binaries                                               | 1989 | Mathieu et al.   | 5   |
| Pre-main sequence spectroscopic binaries suitable for VLTI observations                                     | 2001 | Guenther et al.  | 4   |
| ON THE FORMATION OF HELIUM DOUBLE DEGENERATE STARS AND PRE-CATAclysmic VARIABLES                            | 2008 | Ronald et al.    | 8   |
| DYNAMICAL MASS ESTIMATES FOR INCOMPLETE ORBITS                                                              | 2003 | Schaefer et al.  | 2   |
| KH 15D: A SPECTROSCOPIC BINARY I                                                                            | 1999 | Johnson et al.   | 1   |
| The first magnetic maps of a PMS binary star system- HD155555                                               | 2000 | Dunstone et al.  | 1   |
| OBSERVATIONAL TESTS AND PREDICTIVE STELLAR EVOLUTION                                                        | 1998 | Mamajek et al.   | 18  |
| Impact of the new solar abundances on the calibration of the PMS binary system RS Chamaeleontis             | 2006 | Alecian et al.   | 1   |
| Calibrations of $\alpha$ Centauri A & B                                                                     | 2005 | P. Morel et al.  | 1   |
| Kinematics of W uRSAE majoris type binary and evidence of                                                   | 2005 | Bilir et al.     | 129 |
| Fundamental properties of pre-main sequence stars in young, southern star forming regions: metallicities    | 2006 | D.J.James et al. | 6   |

圖(4.1)一以視直徑法取得之主序雙星間距分布

| 論文名稱                                          | 年分   | 作者               | 資料數 |
|-----------------------------------------------|------|------------------|-----|
| Undroos binary systems X-ray emission         | 2000 | Huelamo et al.   | 50  |
| Near-IR survey of Class I protostars          | 2008 | Connelley et al. | 78  |
| Accurate masses and radii of normal stars     | 2010 | Torres et al.    | 23  |
| ASAS eclipsing binaries with RASS counterpart | 2008 | Szczygieł et al. | 807 |
| Catalogue of wide binaries                    | 2000 | Allen et al.     | 131 |

圖(4.1)一以週期公式取得之主序雙星間距分布

| 論文名稱                                              | 年分   | 作者                | 資料數 |
|---------------------------------------------------|------|-------------------|-----|
| Cataclysmic Binaries, LMXBs, and related objects  | 2011 | Ritter et al.     | 134 |
| Orbital elements of 156 spectroscopic binaries    | 2007 | Mermillod et al.  | 157 |
| Accurate masses and radii of normal stars         | 2010 | Torres et al.     | 23  |
| Semi-detached eclipsing binaries                  | 2004 | Surkova et al.    | 232 |
| Catalog of DMS-type eclipsing binaries            | 1999 | Svechnikov et al. | 113 |
| Properties of eclipsing binaries found in TrES    | 2008 | Devor et al.      | 855 |
| Close double stars                                | 1984 | Svechnikov et al. | 312 |
| 15th Complementary Catalog of SBs                 | 1989 | Pedoussaut et al. | 87  |
| Companions to close spectroscopic binaries        | 2006 | Tokovinin et al.  | 266 |
| Catalogue of wide binaries                        | 2000 | Allen et al.      | 131 |
| 10 active binary radial velocities                | 1999 | Fekel et al.      | 14  |
| 9 visual double stars orbital elements            | 1998 | Alzner            | 9   |
| Evolutionary sequences with MC metallicities      | 1994 | Loore et al.      | 343 |
| Multiplicity of contact binaries                  | 2006 | Pribulla et al.   | 19  |
| Orbits of 171 single-lined spectroscopic binaries | 2002 | Latham            | 171 |
| Apsidal motion in double stars. I.                | 1999 | Petrova et al.    | 254 |
| Accurate masses and radii of normal stars         | 2010 | Torres et al.     | 23  |
| W UMa type and CAB stars dynamical evolution      | 2006 | Eker et al.       | 221 |
| Catalogue of close binaries                       | 2006 | Soydagan et al.   | 177 |
| Orbits of 30 spectroscopic binaries               | 2006 | Griffin et al.    | 32  |
| Angular momentum evolution of Algol binaries      | 2006 | Ibanoglu et al.   | 135 |

(二) 研究參考資料

- (1). 高級中學編輯小組，高級中學地球科學第四冊第三章—恆星及其演化  
3-1.2 一、雙星和聚星
- (2). Goodwin S. P., Kroupa P., Goodman A., Burkert A.(2007)  
The Fragmentation of Cores and the Initial Binary Population  
Protostars and Planets V, pp 133-147
- (3). Low C., Lynden-Bell D., (1976)  
The minimum Jeans mass or when fragmentation must stop  
MNRAS, 176, 367
- (4). Reipurth B. and Zinnecker H. (1993)  
Visual binaries among pre-main sequence stars  
Astron. Astrophys., 278, 81-108.
- (5). Mathieu R. D. (1994)  
PRE-MAIN-SEQUENCE BINARY STARS  
Ann. Rev. Astron. Astrophys., 32, 465-530.
- (6). Duquennoy A., Mayor M.,(1991)  
Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II -  
Distribution of the orbital elements in an unbiased sample  
A&A, 248, 485
- (7). Bradley W. Carroll  
Introduction to Modern Astrophysics  
2nd Edition Benjamin Cummings 2006
- (8). McCauley Patrick. et al  
Accurate Density Measurements of Molecular Cores Using K-Doublet  
Formaldehyde Transition



## 【評語】 040508

以理論與觀測探究雙星形成機制：利用網路搜尋的數據，自行撰寫程式，探討雙星形成的可能原因，對雙星的演化有進一步的瞭解，團隊合作佳。題目具挑戰性，研究過程也很完整，唯只以金斯半徑作為分裂說與捕獲說的假說是否具有可信度，應可以收集其他學者利用其他方法的分析或推斷結果來驗證。