

2013 臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	150006
參展科別	地球科學
作品名稱	星星相映-以理論與觀測探究雙星形成機制
得獎獎項	二等獎

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學

指導教師 李美英、顏吉鴻

作者姓名 王怡方、李嘉寧

關鍵字 雙星演化、金斯不穩定、雙星間距
(separation)

作者簡介



我的名字叫王怡方。從小，爸媽常在假日帶我去住家附近的天文館、科教館遊覽，也常參加許多天文活動，看看美麗的星雲、星團照片與神奇的宇宙演化過程，而對天文的熱愛便油然而生，更想進一步去研究這充滿未知與挑戰的太虛。高中時藉著數理資優班專題研究的機會和天文物理所的教授學習做研究，讓我對天文、物理都有了不同的認識。對我而言，做這個研究是教授與老師的耐心指導、家裡的支持、我眾多的時間精力和幾分的運氣共同砌成的，除了感恩之外，我也認定了這是一條值得走下去的路。



我是李嘉寧。從我小時候，父母對於我的學習總是說要認真踏實，對於新的知識要保持求知的熱誠。我是一個稍為內向但愛讀書的的小孩，而且自小時候，就對於自然方面的東西感到興趣。對於學習東西，特別是在自然科學方面，會想要了解的很透徹、想知道他的原理。當初接觸科展，一方面是因為個人的興趣，另一方面是對地球科學這門學問還蠻有極大的好奇心和興趣，並想藉此機會多認識現今天文研究的進展與方法。

摘要

由於在銀河系中的多數恆星是以雙星系統存在，因此雙星的形成機制在恆星演化理論中扮演極重要的角色。但目前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，找尋上萬筆的觀測數據，並對其資料來源做觀測限制上的確認，進而分析雙星間距的分布，且以雙星的星團與光譜型為分類作圖。分析後的結果中，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，得出了分裂說必定存在，然無法排除捕獲說的存在；並且發現不同星團、光譜型對間距的關係有顯著的差別。

Abstract

It is well known that a large fraction of stars are actually not single stars but binary systems. Therefore, the formation of binary stars must be an integral part of any theory of star formation. However, there are still lots of different hypothesis in the theory of binary formation, but none of them have been proved to be true. One of the versions is that both stars of binary systems come from the same molecular cloud, which is known as the fragmentation scenario. Another one considers that each cloud will collapse into a star, and two of the stars circle each other, turning into binary because of gravity, which we call capture scenario.

In our research, we collected a large number of both pre-main and main-sequence binary catalogs. We apply the theory of Jeans instability and calculated Jeans mass, Jeans radius and the minimum mass and radius of molecular cloud fragmentation, trying to infer the probable forming system of binary. In our result, we find that the separations of most pre-main and main sequence binaries turn out to be close, and this matches the opinion of the fragmentation scenario. However, there are still a considerable number of large separation binaries, which support the capture scenario, and so that we could not exclude its existence. Thus, we hope to collect more data and use a more accurate calculating way to prove the correctness of our result.

壹、前言

一、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！

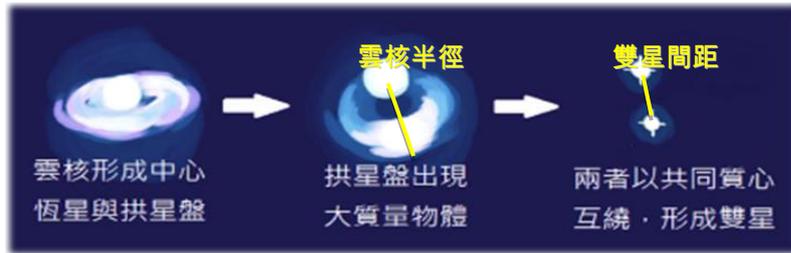
經過資料搜尋，我們發現雙星的形成機制正是目前天文學界中非常熱門的研究議題，而關於雙星的形成機制有不同的假說，然而我們發現，在許多研究論文中，大多只用了數十甚至數個雙星的觀測結果，就對雙星的演化下了定論。所以我們蒐集了大量的數據進行統計，以較具可信度之方式觀察雙星演化趨勢。我們希望能在不使用昂貴的天文儀器來進行研究的情況下，利用網路上人人都可取得的觀測資料以及高中物理學到的雙星質量週期公式與視直徑法來取得結論，尋找可以支持假說的證據。

二、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

是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、質量、分子雲與雙星的光譜型，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。

*註：見名詞解釋(頁 3)

三、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
	

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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。

5. 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。
6. 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。

貳、 研究方法或過程

一、文獻探討—前人對雙星形成演化機制研究之成果

目前雙星形成的理論對分子雲的塌縮，而後如何形成雙星互繞，未有定論。

(一) *The Fragmentation of Cores and the Initial Binary Population by*

Simon P Goodwin(et al.) (參考文獻 1)

此論文中撰述了前人研究中統計的雙星間距、主星與伴星的質量比和繞行週期等等，但分析後發現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。

(二) 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。

(三) Binary stars - Formation by fragmentation

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

(四) Capture-formed Binaries via Encounters with Massive Protostars

支持捕獲說。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。

(五) The Multiplicity of the Hyades and Its Implications for Binary Star Formation and Evolution

支持分裂說。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。

(六) 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(三)~(六)，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、熱能恰可抵銷。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(2)），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—金斯質量推導

求出使分子雲得以開始塌縮的最小質量

(塌縮的質量 $M_c \geq$ 金斯最小質量 M_J)

依維理定律 (Virial theorem)

當 $2K = -U$ ，分子雲會處於穩定狀態，不塌縮亦不膨脹

K 為動能，為分子雲向外膨脹的能量， U 為位能，為分子雲向內壓縮之能量

當 $2K < -U$ 時，分子雲即會崩塌

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

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

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

2. 恆星理論距離—金斯半徑推導

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 ，以 $M_J = \frac{4}{3}\rho R_J^3$ 代入(2)，得到

金斯半徑 R_J

$$R_J \approx \left(\frac{15kT}{4\pi\rho G\mu m_H}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

3. 恆星產生率—依理論推算其塌縮時間

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。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) 當分子雲塌縮時，密度增加，造成塌縮所需的金斯質量變小，導致部分地區進行各自塌縮(因各部份已達其縮所需之質量)，進而造成裂解。
- (2) 在分子雲塌縮，密度增加的同時，釋出的重力位能須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(2)，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 $L_{ff} = \frac{\Delta E_s}{t_{ff}} \approx G^{3/2} \left(\frac{M_J}{R_J} \right)^{5/2}$ ，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 $L_{ff} = L_{rad}$ ，可以得金斯最小質量

$$M_{J_{min}} = 0.03 \left(\frac{T^{1/4}}{e^{1/2} \mu^{9/4}} \right) M_{\square}，\text{並可以得到金斯最小半徑}$$

$$R_{J_{min}} = \left(\frac{M_{J_{min}}^{5/2} G^{3/2}}{4\pi \sigma e T^4} \right)^{2/9}$$

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 $M_{J_{min}} = 0.03 \left(\frac{T^{1/4}}{e^{1/2} \mu^{9/4}} \right) M_{\square}$ 計算。

$1 > e > 0$ ， μ 則為分子雲的平均分子量，取值 1，

$T = 0 \sim 1000K$ 。

步驟2. 選擇不同的 e 及溫度 T ，作 $M_{J_{min}} - T$ 關係圖與 $M_{J_{min}} - e$ 關係圖。

步驟3. 分析結果。

2. 計算金斯最小半徑 R_{Jmin}

步驟1. 選擇不同的 e 及溫度 T ，作 $R_{Jmin} - T$ 關係圖。與 $R_{Jmin} - e$ 關係圖。

步驟2. 分析結果。

(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

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

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

● 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) 間距

步驟1. 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2. 視直徑法部分，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3. 我們蒐集了數十個星表，共 10256 筆雙星間距資料(參考資料)。

2. 前主序帶(pre main sequence) 間距

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。

統計雙星系統中主星的光譜型與間距的關係

- 步驟1. 在上述程式輸出的檔案中，選取已確定其所主星光譜的雙星，利用 EXCEL 將其排列，分為 OBAFGKME 光譜型，並將屬於同光譜型之雙星的挑出。
- 步驟2. 把所有資料製成表格，將其對應的雙星間距分別用 FREQUENCY 計數，並繪製出雙星間距分布圖。
- 步驟3. 查詢光譜型的資料並將之與假說比對。

參、 研究結果與討論

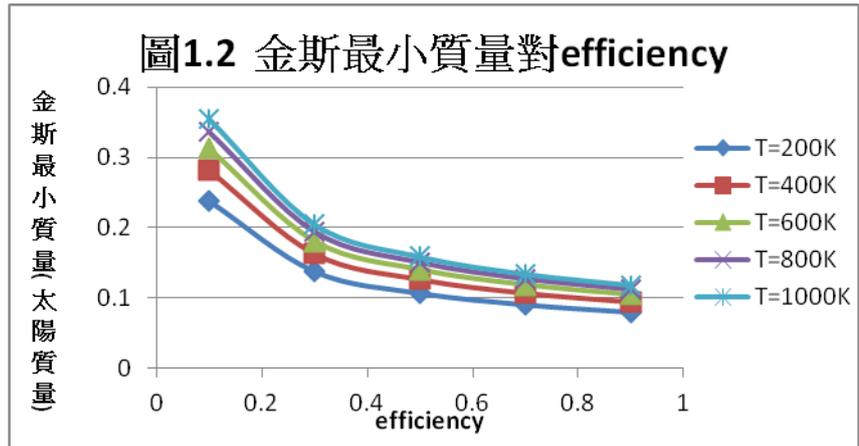
一、研究結果

(一) 理論分析

1. 計算分子雲裂解的最小質量

--改變溫度，觀察溫度的影響

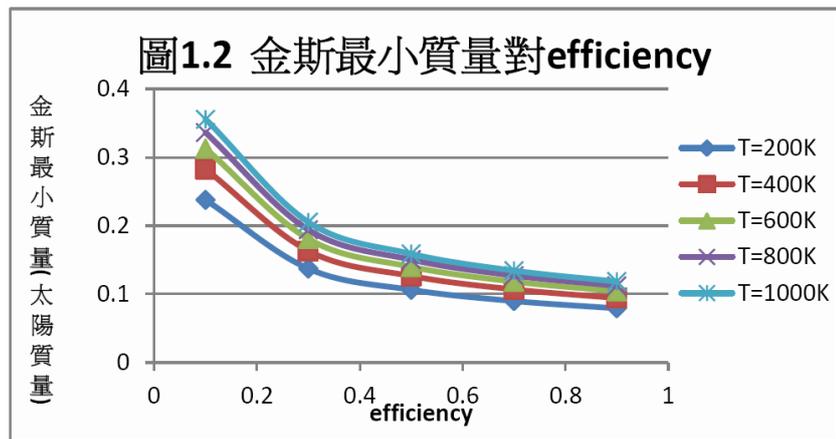
取 e 分別為 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 作 $M_{j_{\min}} - T$ 圖(1.1)



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)



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

$$7.93E-02 \sim 3.56E-01 M_{\odot}。$$

2. 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

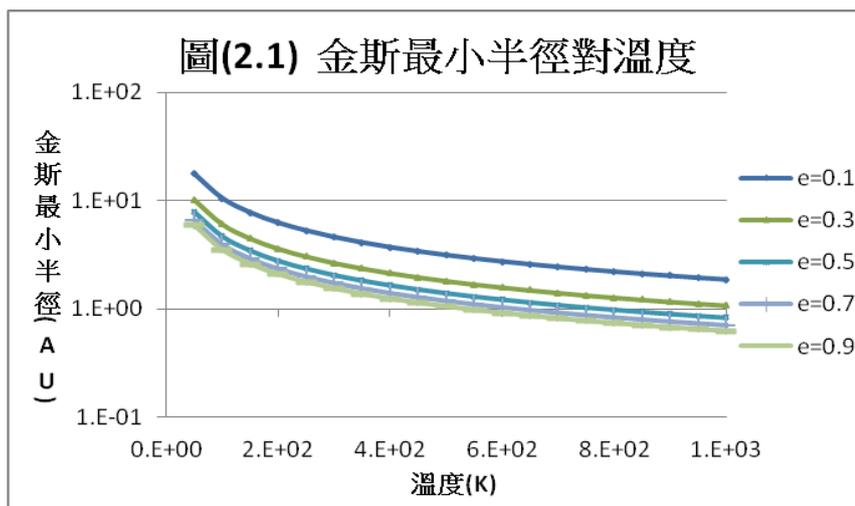


圖 (2.1)

----改變 e ，觀察 e 的影響

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

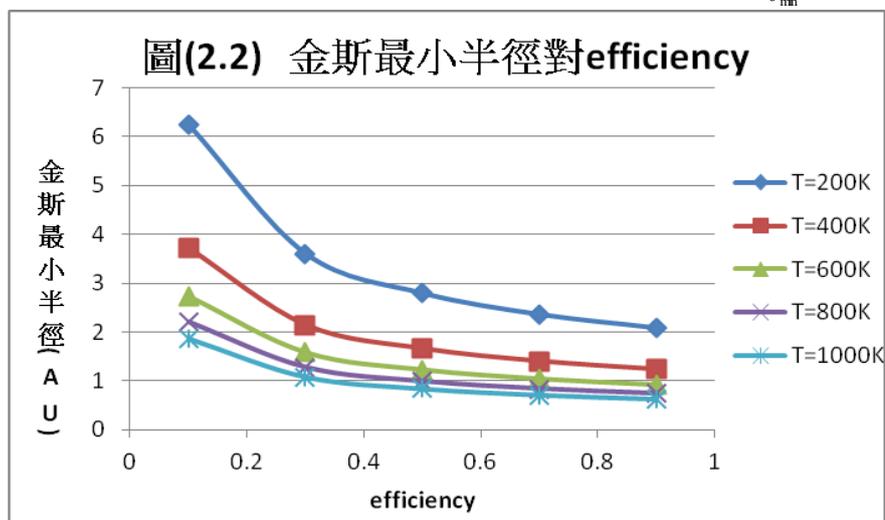
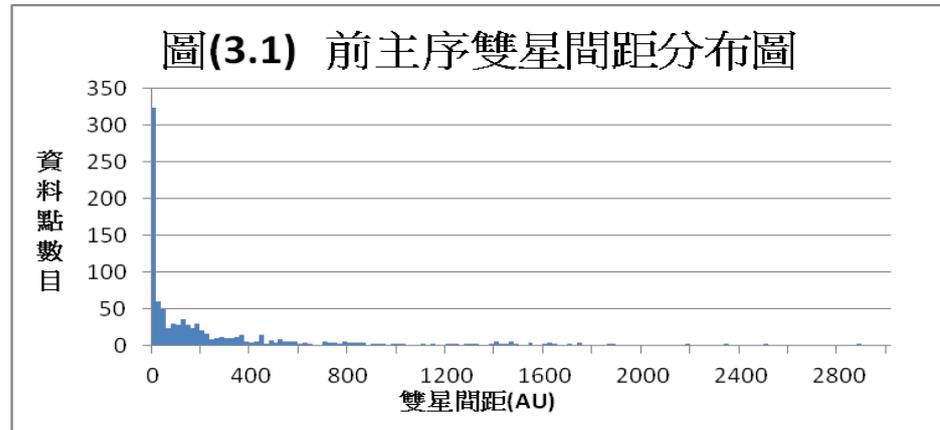


圖 (2.2)

- (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_{\min} 約等於 $0.623 \sim 17.7$ AU

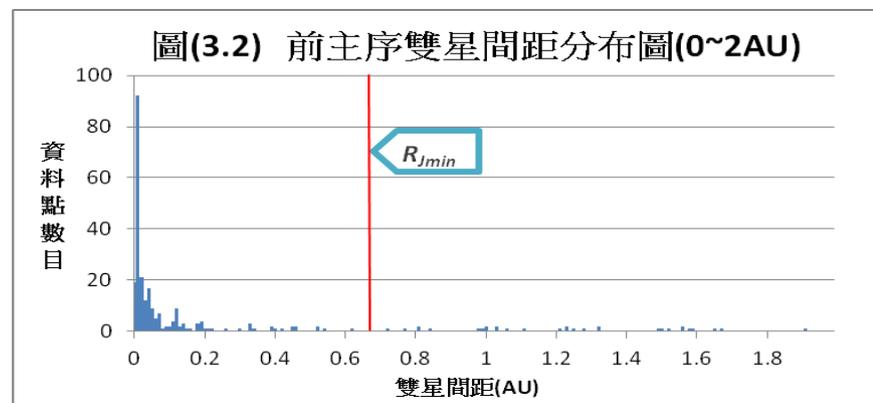
(二) 觀測資料分析

1. 統計前主序雙星之間距



圖(3.1)

- (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)。



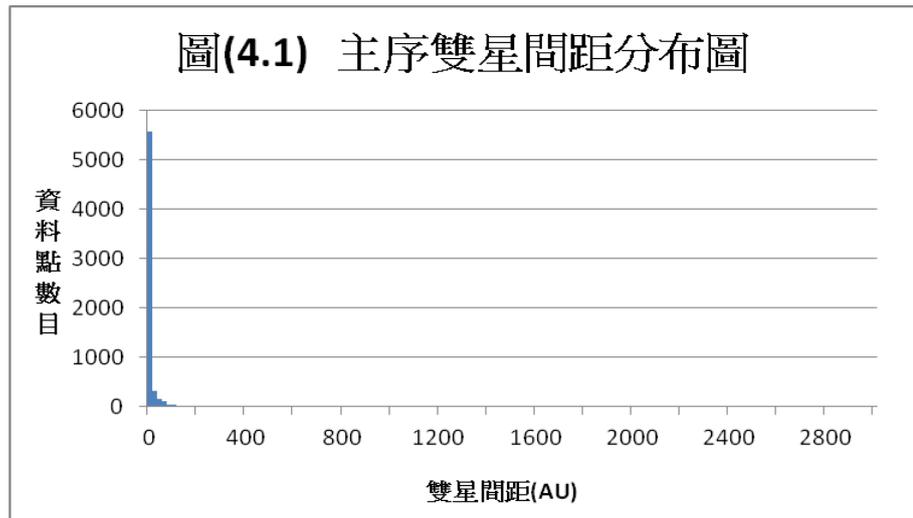
圖(3.2)

- (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。

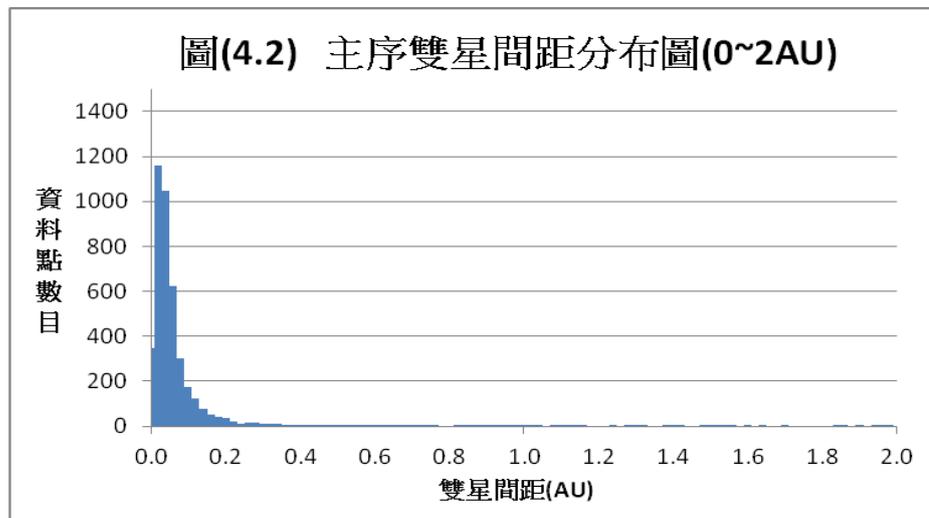
- (3) 因此，如果我們能夠得知銀河系中分子雲核的平均半徑，便可以推知分裂說與捕獲說之存在比例，然由於分子雲核不易觀測，現階段我們尚無法取得這方面的觀測資料並進行有關假說存在比例的推論。

2. 統計主序雙星之間距



圖(4.1)

- (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。

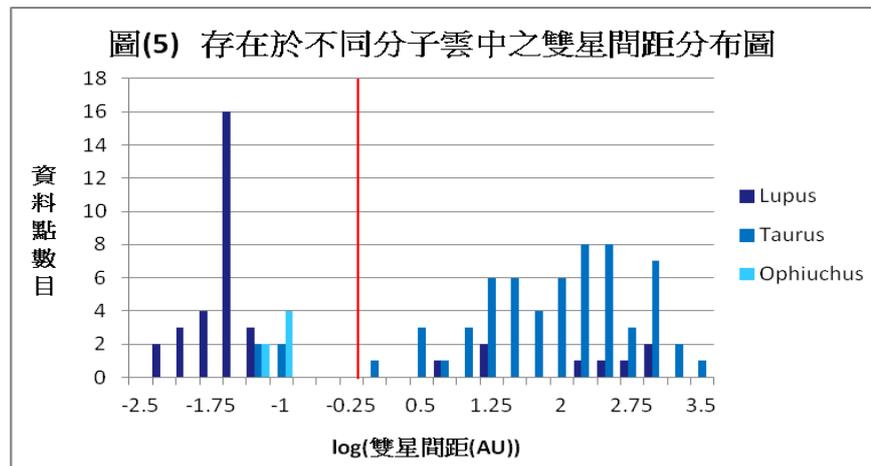


圖(4.2)

(1) 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)，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。

3. 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)。



圖(5)

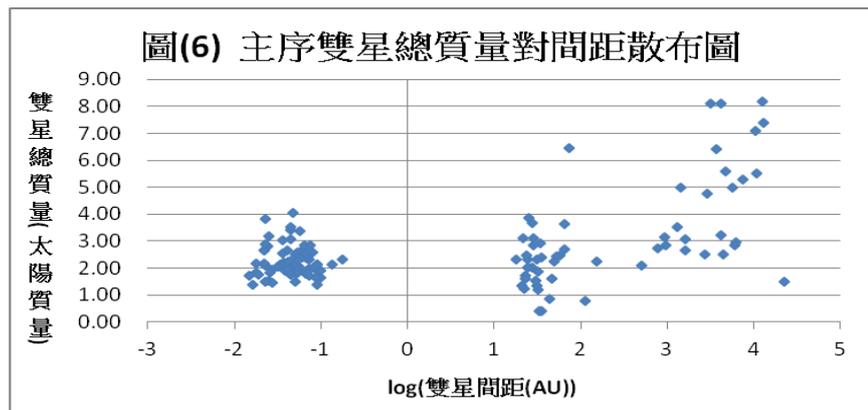
- (1) 由圖(5)我們可以明顯觀察到，位於 Lupus 和 Ophiuchus 中之雙星間距偏小，而在 Taurus 中的雙星其間距則較大。
- (2) 由於三個分子雲和地球之距離相近(Lupus、Taurus 距地球約 140pc，Ophiuchus 距地球約 125pc)，因此可以排除視直徑法之觀測限制(討論-二)可能造成的偏差。
- (3) 我們推測相同分子雲中，因其形成環境相近或其他原因，使其中雙星有較類似的性質，而不同分子雲中的雙星則可能有差異，因此雙星之間距可能和其所在分子雲是有關係的，也就是說，各個分子雲中的雙星可能有共同的形成機

制，而不同的分子雲之間則是有差異的。

- (4) 我們對這三個分子雲的某些環境因子做了調查，發現三者
在粒子密度、活躍程度和恆星形成率等方面皆有差異，判
斷後認為可能是造成分子雲中雙星形成機制不同的原因。
- (5) 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。

4. 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。



圖(6)

- (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

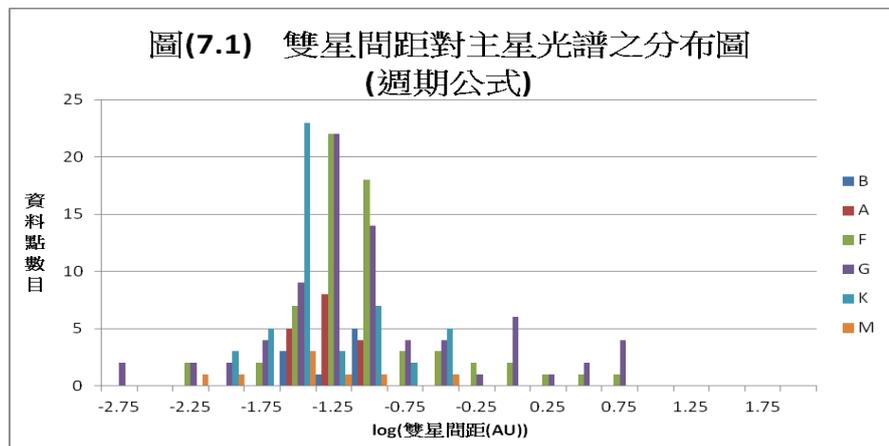
響其質量，而大間距雙星則因由捕獲而來，兩顆星距離遠，其間重力關係較弱，較可能因為外界影響而散失或取得質量。

必須說明的是，在這兩個探討部分(統計不同分子雲中雙星間距分布之差異、以主序雙星總質量對間距做散布圖)，我們並非取用我們所有的雙星樣本，而是僅以具備所需資訊的樣本做圖。

5. 統計雙星系統中主星的光譜型與間距的關係

我們蒐集了我們前主序雙星樣本中主星的光譜型，並以此對該雙星系統的間距作圖，觀察雙星間距與主星光譜型的關係。

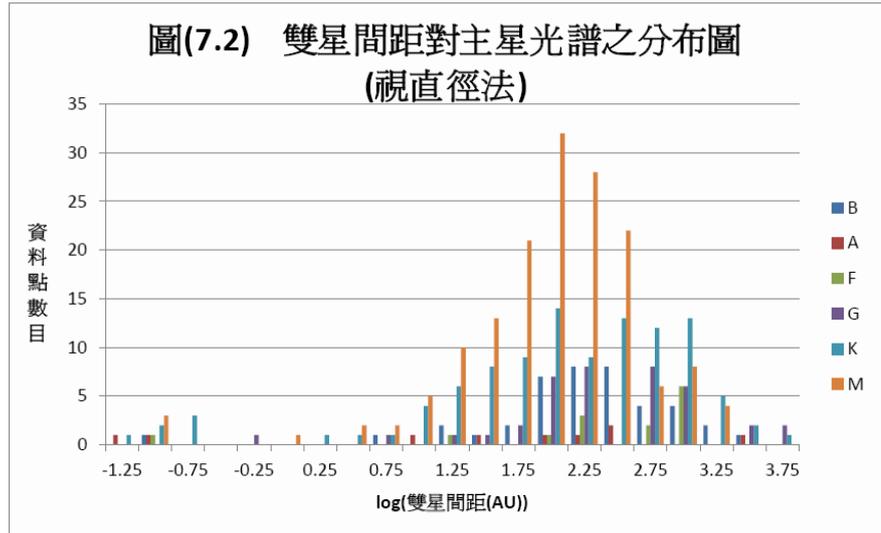
以雙星週期公式取得間距之雙星



圖(7.1)

- (1) 在圖(7.1)中可觀察到，以週期公式取得之雙星間距偏小。
- (2) 比較各類光譜的雙星主星，發現以光譜型 F、G、K 居多，而 M 極少。

以視直徑法取得間距之雙星



圖(7.2)

- (1) 在圖(7.2)中可觀察到，以週期公式取得之雙星間距偏大。造成兩種方法取得之雙星間距大小有不同趨勢之原因，我們將在討論的觀測資料分析中進行討論。
- (2) 比較各類光譜的雙星主星，發現 M 型星佔了極大部分，形成和圖(7.1)的巨大差異。我們認為造成這種現象，除了雙星本身差異外，可能和觀測限制有關。
- (3) 在 M 型星的光學波段是最後的一個光譜型，比較黯淡，導致光譜較難取得，所以用週期公式取得的雙星就會比較少(小間距雙星的週期乃是以光譜取得)。
- (4) 相反的，以視直徑法取得的大間距雙星因為要直接觀測，如果主星太亮，便會掩蓋伴星星光，因此導致以視直徑法取得之雙星，主星以 M 型星為主。
- (5) 假若扣除觀測限制後，以不同方法取得之雙星光譜分布依然有此差異，那就是值得探討的問題了。

二、討論

(一) 理論分析

1. 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

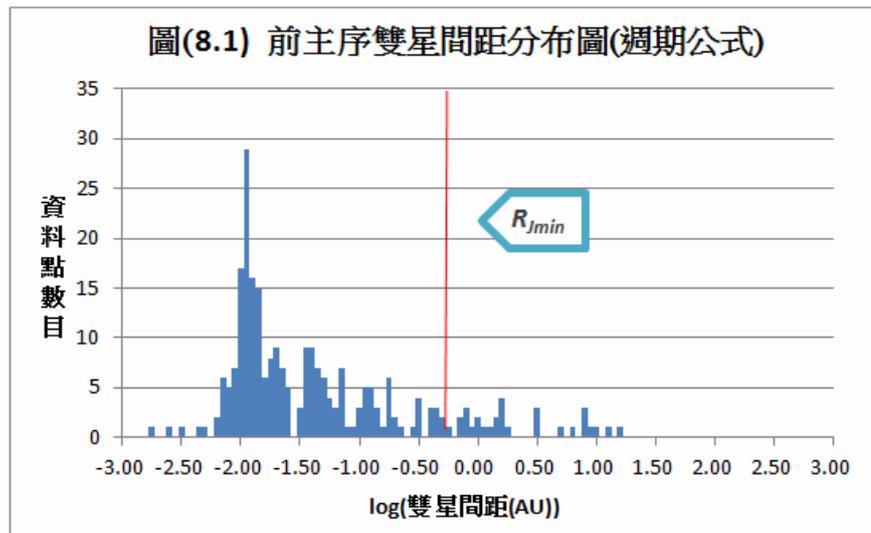
文的數據。

2. 我們取的溫度為 $0 \sim 3000K$ ，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。
3. 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

1. 以不同算法--週期公式與視直徑法--得出的雙星間距數據

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



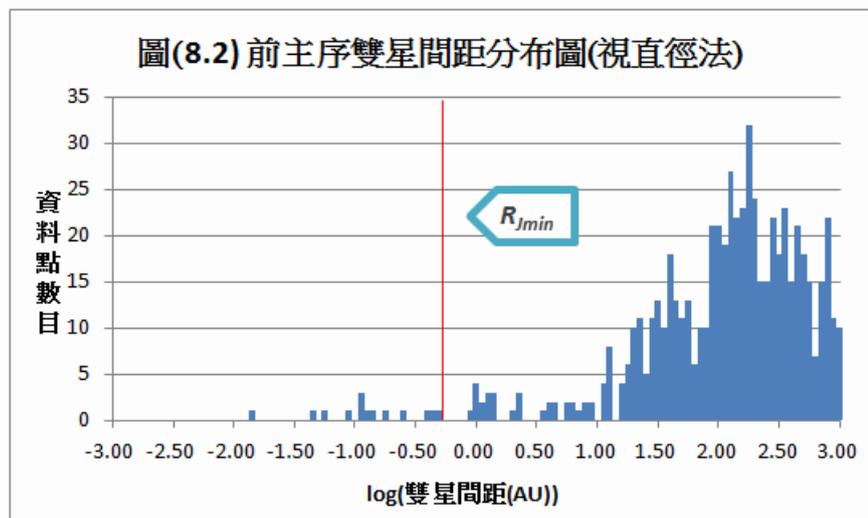
圖(8.1)

由圖(8.1)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 $R = d\theta$



圖(8.2)

由圖(8.2)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。

2. 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。

3. 如上討論 2、1.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，因此我們對我們資料來源的主要幾個星表做了觀測限制的調查，分述如下：

- (1) 以週期公式取得之雙星：

[1] 星表論文：Kinematics of W Ursae Majoris type binaries and evidence of the two types of formation

作者/年分：S.Bilir et al./2004

資料筆數：126 筆

星表中提到光譜在分光時，天體速度大小對其造成限制，而星體若因速度過小使光譜分光不易，則無法得知雙星的週期，造成我們以雙星週期計算雙星間距的這種方法存在有觀測限制。論文中說到樣本星體的速度約為 7km/s。換算週期後可知觀測限制的範圍約為間距小於 36AU 的雙星。

[2] 星表論文：Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II - Distribution of the orbital elements in an unbiased sample

作者/年分：Duquennoy and Mayor/1991

資料筆數：54 筆

這篇星表則是利用長時間的觀測，配合標準星的速度來測定星體樣本的速度。其限制大約為 0.3km/s，計算過後雙星間距的限制範圍約需要小於 20000AU。

[3] 星表論文：Fundamental properties of pre-main sequence stars in young, southern star forming regions: metallicities

作者/年分：R.Wichmann et al./1997

資料筆數：46 筆

論文中列出了不同星雲中星體的速度，自 2~12km/s 不等，計算後可知雙星間距約需要小於 12~444AU。

(2) 以視直徑法取得之雙星：

[1] 星表論文：VISUAL BINARIES IN THE ORION NEBULA CLUSTER

作者/年分：Reipurth et al./2007

資料筆數：94 筆

這篇星表中所使用的觀測工具為哈伯望遠鏡，該望遠鏡之解析角為 0.05 角秒，而表中雙星皆位於距地約 412pc 處，計算後可得其觀測限制範圍約是間距大於 20AU 的雙星。

[2] 星表論文：Visual binary among pre-main sequence stars

作者/年分：Reipurth, Bo et al./1993

資料筆數：80 筆

論文中說明該篇星表是以丹麥的 1.5m 望遠鏡作觀

測，解析角約為 1.0~1.1 角秒。而表中天體與地球距離多位於 150pc 附近，計算後可得其觀測限制範圍約是間距大於 165AU 的雙星。

[3] 星表論文：PRIMORDIAL CIRCUMSTELLAR DISKS
IN BINARY SYSTEMS: EVIDENCE FOR REDUCED
LIFETIMES

作者/年分：Cieza et al./2009

資料筆數：125 筆

該星表所使用的望遠鏡為 3.5-8.2 公尺口徑望遠鏡，搭配觀測波長計算得解析角約為 0.13~0.06 角秒；研究者並同時以月掩星測定觀測，精確度可達 0.005 角秒。觀測的星體約位在距地 125~160pc 處，計算後可得觀測限制範圍大約是間距大於 7AU~20AU 的雙星。

經過我們種種判斷與上述檢驗後，我們選擇排除上述想法：

[1] 圖(8.1)中峰值的右側與圖(8.2)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

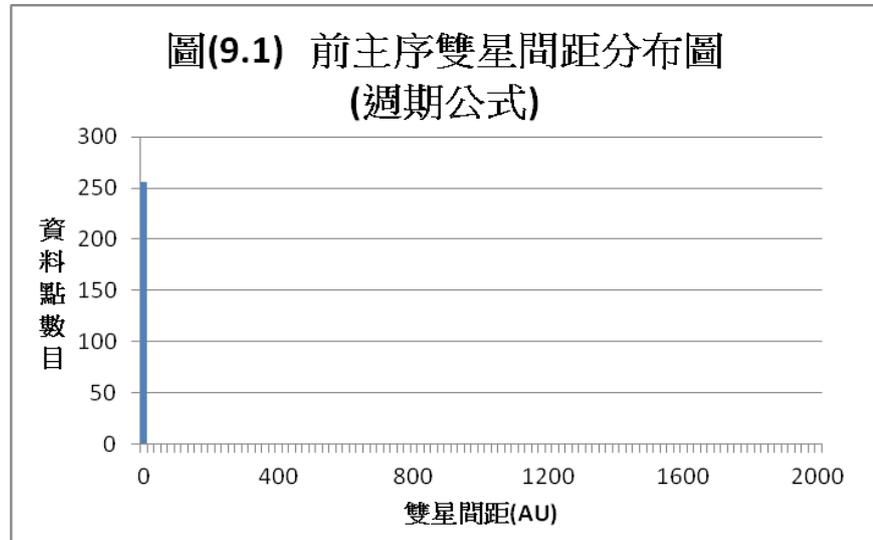
[2] 圖(8.1)中， $\log(\text{雙星間距(AU)})$ 為-1.5~-0.5 處，資料點數目已經少到一個程度，但該處雙星之週期只有一至數天，不應是週期公式的觀測限制範圍。

[3] 同理，在大間距雙星的部分，有許多雙星期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。

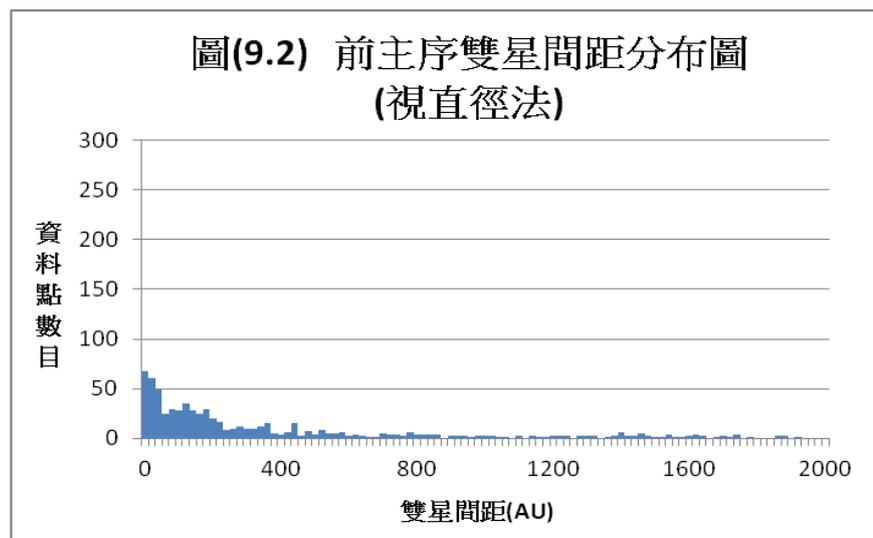
[4] 我們因此對觀測限制進行實際了解，發現兩種計算方法的限制範圍的確有相接續，證明所謂觀測限制對我們的結果的正確性並未造成重大影響

不過，儘管圖(8.1)、(8.2)中顯示以兩種不同方法取得的雙星

間距峰值有巨大的差別，必須說明的是，圖(8.1)、(8.2)的雙星間距是取過對數後作圖的，因此圖的橫軸亦是以對數呈現。

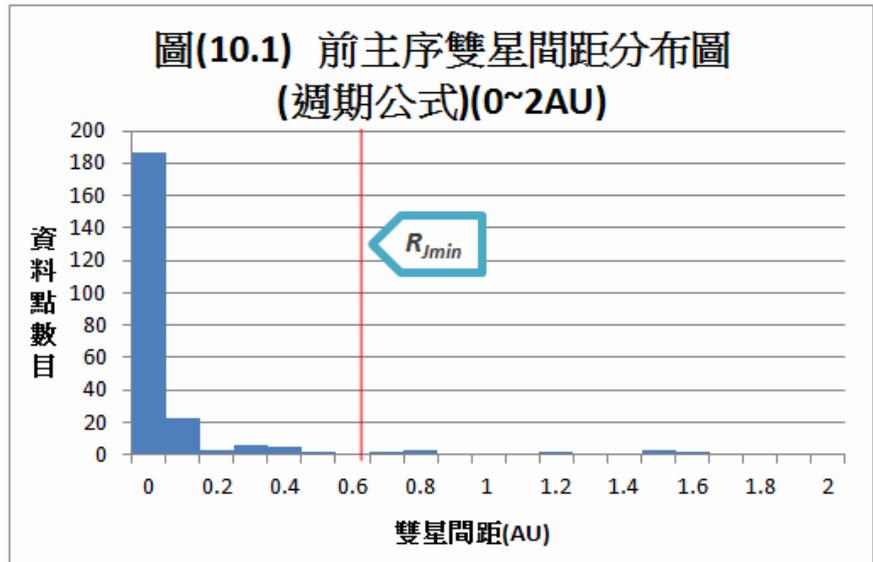


圖(9.1)

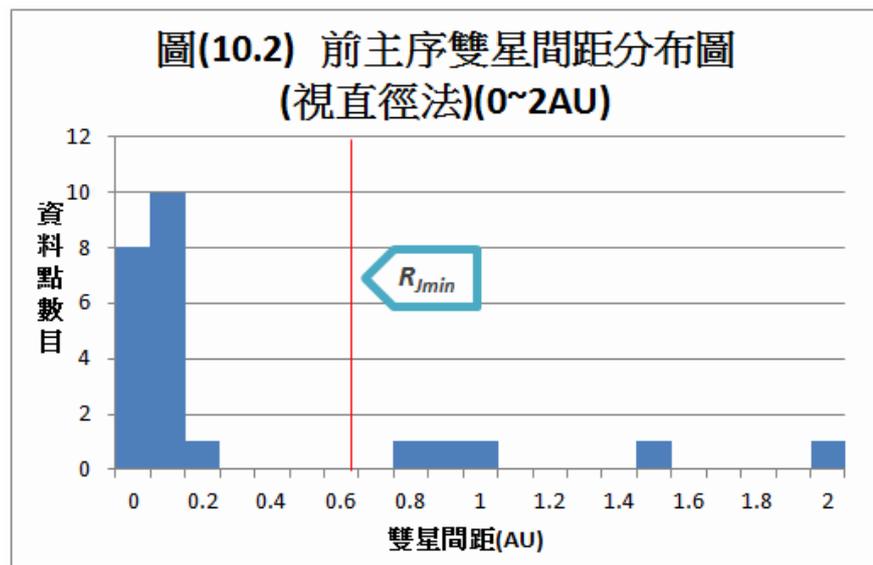


圖(9.2)

圖(9.1)、(9.2)中我們呈現的是以不同方法取得的雙星間距，不過橫軸並未取對數。圖中可以見到，兩圖的峰值大致是相同的，也就是說，以不同方法取得之雙星間距其實並非真如圖(8.1)、(8.2)那樣，呈現兩極分布。因此若只看圖(8.1)、(8.2)以斷定結果，可能造成分析上的偏差。



圖(10.1)



圖(10.2)

為了深入了解雙星間距的真實分布情況與峰值位置，並與金斯最小半徑比較，我們將橫軸的雙星間距範圍縮小為 0~2AU，繪製為圖(10.1)、(10.2)。在圖(10.1)、(10.2)中，我們可以看到不管是何種取得方法，其峰值皆小於金斯最小半徑，不過以視直徑法取得之雙星間距峰值仍比以週期公式取得者稍大。

由圖(9.1)、(9.2)和圖(10.1)、(10.2)，我們可以發現其實以不

同方法取得的雙星間距分布差別並沒有那麼大。

4. 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，才能夠得出正確的結論。

(三) 與前人的研究結果對照

1. **A statistical study of binary and multiple clusters in the LMC**

這篇論文認為捕獲說發生的機率不大，但不排除其存在性。作者採用了 50 筆雙星的間距和年齡數據，其研究結果顯示雙星主伴星年齡差距較大者其間距也較大，然其趨勢並沒有像前人 (Efremov & Elmegreen- 1998)說的那麼明顯。論文中也提到大多數的雙星應是由分裂而來，但年齡差距較大者(大於一千萬年)可確定為捕獲，約佔有年齡數據之雙星的 1/5。

2. **The Multiplicity of The HYADES and Its Implications for Binary Star Formation and Evolution**

此論文採用了 147 比雙星間距與質量數據，其中雙星間距約為 5-50AU 之間，大於和小於金斯最小半徑者皆有之。作者指出分裂和捕獲兩種假說皆存在，而其主要以雙星質量研究，他認為由捕獲形成的雙星通常質量較大，而由分裂說形成的雙星期質量則大約介於 0.6~3.0 個太陽質量之間，大致與我們的質量統計相同。

3. The Formation of Massive binary stars

這篇論文主要是理論研究，並沒有使用雙星數據。作者認為大質量雙星很有可能以捕獲說形成。

4. Multiplicity among T Tauri stars in OB and T associations.

Implications for binary star formation

以比較主伴星光度判斷觀察到的雙星是支持分裂說，此篇論文觀察到的雙星間距皆小於 10AU，其中有 34 筆與我們研究中的間距相符，且小於 0.65AU，與我們所言小於金斯最小半徑者為分裂說相符合。然而其中也有大於金斯最小半徑的間距數據，因此大於金斯最小半徑的也可能為分裂說，但並不與我們的研究結論相牴觸。

5. Kinematics of Ursae Majoris type binaries and evidence of the two types of formation

研究密近雙星，發現若密近雙星是由捕獲而來，其角動量損失與週期減少的速度並不足以使其從分開的兩顆恆星變成如此密近，得出支持分裂說的結論。此研究所用的數據有 102 筆與我們研究所用的數據相同，皆小於 0.65，與我們的研究相符合。

肆、 結論與應用

一、 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 $M_{J_{\min}} = 0.093\sim 0.468 M_{\odot}$ ，金斯最小半徑 $R_{J_{\min}} = 0.674\sim 6.25AU$ 。

(二) 觀測資料分析

1. 透過雙星間距的統計，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。

2. 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。
3. 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環境是有關係的，而我們懷疑這些環境因子可能是粒子密度、活躍程度和恆星形成率等。
4. 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。
5. 由兩種計算方法所取得之雙星其主星光譜型在 M 型星數量上的巨大差異，我們認為由於 M 型星較黯淡，光譜較難取得，所以用週期公式取得的雙星較少。而以視直徑法取得的大間距雙星因為要直接觀測，如果主星太亮，便會掩蓋伴星星光，導致以視直徑法取得之雙星，主星以 M 型星為主。
6. 將前主序雙星間距分布圖中得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，不過間距大於金斯最小半徑之雙星亦為數不小，雖然大間距的雙星也可能由分裂說形成(來自巨大雲核)，但如此並無法排除捕獲說的存在。

我們秉持懷疑態度對觀測限制進行種種分析，發現觀測限制對我們的結果的正確性並未造成重大影響，因此我們判斷以兩種計算方法算出的雙星間距都是確實存在且正確的，故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，才能夠得出正確的結論，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。在我們的研究中，我們在不同算法中取得不同結果，並透過合理的解釋，得出雙星分裂說必定存在結論，並且推定在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。

二、未來展望與應用

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. 我們希望能扣除掉雙星光譜方面的觀測限制，如果以不同方法取得之雙星主星光譜仍有不同趨勢，便可以進一步探討其演化過程。
5. 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。

伍、 參考文獻

(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：

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 A1129-32	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	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-Auriga and Ophiuchus-scorpius	1993	Ghez	32

圖(7.1)—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 PRECATAclysmic VARIABLES	2008	Ronald et al.	8
DYNAMICAL MASS ESTIMATES FOR INCOMPLETE ORBITS	2003	Schaefer et al.	2
KH 15D: A SPECTROSCOPIC BINARY1	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 α 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(7.2)—以視直徑法取得之前主序雙星間距分布

(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

針對雙星研究提供一套理想的資料分析與分類方法，若能進一步分析雙星的成分光譜，應可確認雙星是否由捕獲而成，對兩種觀測分析方法都適用的雙星系統，建議進一步比較兩種方法所得到的距離是否一致。