

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160011

參展科別 物理與天文學

作品名稱 以 SPH 模擬螺旋星系旋轉軸角及其影響星系
碰撞結構之關係探討

得獎獎項 大會獎 三等獎

就讀學校 臺北市立建國高級中學

指導教師 葉昭松

作者姓名 陳佑軒

關鍵詞 螺旋星系碰撞、星系旋轉軸角、新螺旋星系分類

作者簡介



我是陳佑軒，目前就讀建國中學二年級；從國中就開始喜歡上物理的我，在高一時因緣際會下喜歡上了天文物理。在做科展的過程中，我遇到了許多困難，不僅需要同時解決研究上的問題，還要兼顧課業，卻在過程中學到很多。最後，非常感謝葉昭松老師的指導，讓我的研究更加完善。

摘要

星系的碰撞機制屬星系演化中非常重要的過程，目前研究多以星系質量比、速度等變因如何影響碰撞後星系性質為主。而本研究認為星系旋轉軸角也是影響星系碰撞的重要因素之一，故以 SPH 模擬螺旋星系旋轉軸角度對星系碰撞結果的影響。分別模擬以角度單變因，以及搭配其他參數之多變因情形。

根據模擬結果，發現兩初始星系在直接碰撞（撞擊參數等於零）時，若以碰撞角、初始角差異近似於 0 度以及 180 度時搭配高速低值量比進行碰撞，較能形成低核盤比的橢圓星系。間接碰撞時，若旋轉軸貼近速度軸、兩初始旋轉軸夾角小，以及初始盤面平行等情形下，較能形成低核盤比的螺旋星系。

本研究也發現碰撞後星系長軸分佈聚集於 0 與 180 度區域，可用來探討橢圓星系軸向問題。最後，本研究以核盤比作為新式星系碰撞分類標準，建立螺旋星系演化機制的參考。

Abstract

I present a new variable that could cause huge difference in Spiral Galaxy Collision. By using Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH) simulation, I have figured out the Angular factor plays an important role in spiral galaxy evolution. I simulate how it could affect spiral galaxy with direct and indirect collision, and the influence along with other factors, such as mass ratio and initial relative velocity. My goal is to analyze how it could change the result of the collision dependently and independently, and after all came up with a method to classify galaxy collision.

DAA, Velocity dispersion, Disk-Bulge Ratio, and the distribution of the semimajor axis are four key parameters described in this paper. In the case of direct collision, to create a near-spiral galaxy (high DAA, low Disk-Bulge Ratio, and low Velocity Dispersion); the initial “Collision Angle” of both galaxy has to be 0 or 180 degrees and has to be similar, the “Angle Between” also has to be 0 or 180 degrees, the mass ratio is between 2 and 5, and the initial velocity should over 196.8 km/s. In the case of indirect collision, to create a near-spiral galaxy, the disks have to be paralleled and also paralleled to the collision plane, both initial rotational axes should be near to the velocity axis, and the impact parameter should be high.

After the simulation, an interesting phenomenon of the uneven distribution density of the after-collided galaxy semimajor axis. The result shows that 95% of the semimajor axis is distributed at the area of 0 or 180 degrees from the collision axis. Through this result, I can use it to estimate the collision axis of an Elliptical galaxy since most of these galaxies are formed by collided spiral galaxies.

After all, through this paper, I use the results from above to create a galaxy merger morphology judging in its disk-bulge ratio; also a method to estimate the collision axis of Elliptical galaxies.

壹、前言

(一) 研究動機

螺旋星系(spiral galaxies)的碰撞在星系演化過程中佔非常重要的一環，其中質量比、碰撞速度可造成不同的碰撞結果，也影響著此星系在未來是否穩定。目前對於螺旋星系碰撞的研究主要是探討星系的質量比問題；本研究猜測星系盤面旋轉軸角度亦會對其結果造成改變，例如造成不同的速度離散(velocity dispersion)、核盤比等；因此我以星系盤面之旋轉軸角為新參數，探討它與其他變因(例如質量比、相對速度)之關係與碰撞結果，進而分析最大 DAA、核盤比、速度離散等對星系演化重要之資訊。

(二) 研究目的

使用光滑粒子流體動力學模擬星系以不同旋轉軸角搭配其他參數（例如質量比、相對速度）進行碰撞，藉此探討星系碰撞結果的影響因素，主要想探討的問題有三：

1. 「星系旋轉軸角」與其他變因搭配後對星系碰撞後結果之影響。
2. 「星系旋轉軸角」對星系碰撞的影響是否有限制。
3. 針對「星系旋轉軸角」量化星系碰撞以及哈伯分類法之改良。

貳、研究方法與過程

(一) 研究設備與器材

在宇宙中的星系碰撞實際過程耗費上億年，如今利用望遠鏡在天空中觀測到的只是在整個碰撞過程中的某一瞬間(圖一)，且各種影響碰撞的因素不易經由觀測釐清，因此我決定使用 SPH 建模來進行電腦模擬，這樣的模擬不僅能控制時間變因，更可剔除外在重力干擾的影響。

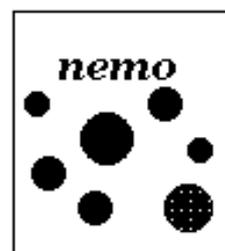


圖(一): Galaxy Pair APR 87 為兩螺旋星系碰撞的一瞬間
(哈伯太空望遠鏡拍攝)

本研究使用的模擬軟體如下:

1. Nemo - A Stellar Dynamic Toolbox

Nemo(圖二) 是一個光滑粒子流體力學(SPH¹)的 N-Body 天文物理學模擬軟體，由 C 語言與 Fortran 編譯而成，並被使用在許多天文物理的論文中。它的作者由三位科學家 Barnes Joshua、Piet Hut 與 Peter



圖(二): Nemo

Teuben 共同創作而成。此軟體主要是在模擬重力的作用下，輸入初始星際物質的運動。本研究即以此軟體來模擬星系對不同參數下的碰撞。

2. Python 3.8

Nemo 軟體可將模擬結束的瞬時結果(snapshot)轉換成 CSV file，我再以 python-3.8(圖三)中的 numpy、math、csv module 寫出一套演算法，來分析電腦模擬的結果。



圖(三): Python 3.8

3. Glnemo2-1.10.0 for ubuntu

Glnemo2 可以將 Nemo 模擬完的文字資料圖像化，以用於圖像分析。

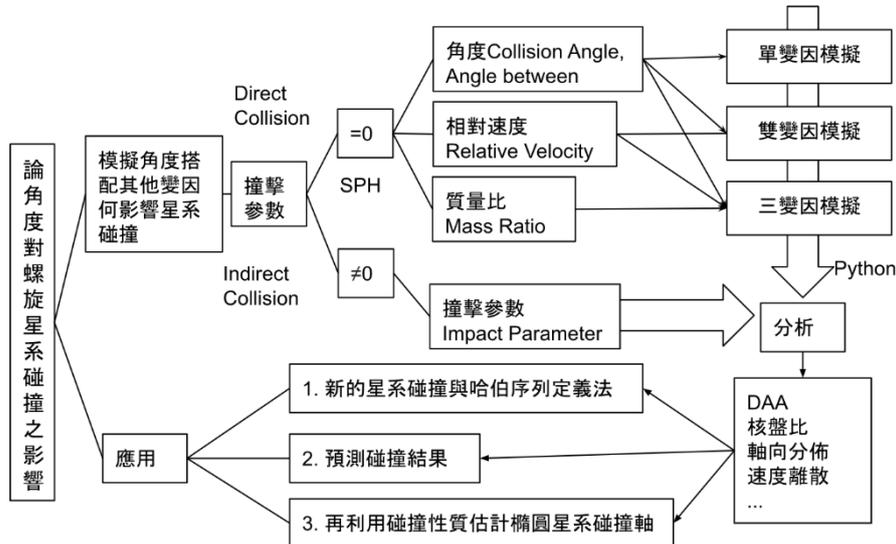
4. Gadget-2.0.7

Gadget2 也為一 SPH 模擬軟體，在本研究中主要被用於星系以不同軌道特性的碰撞角關係。

¹ SPH Simulation: 光滑粒子流體動力學模擬(Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation)。光滑粒子流體動力學將連續流體分成一組稱為粒子的離散元素。這些粒子具有空間距離，攜帶了其所在位置的流體的性質，時常被使用在天文物理中，可表達星體在宏觀狀態下的流體性質。(https://en.wikipedia.org/wiki/Smoothed-particle_hydrodynamics)

(二) 研究方法

1. 研究架構圖



2. 模擬

(1) 模擬時間: 650 units (約為 91 億年²)

(2) 星系總質量: 6.25 units (3.125×10^{11} solar masses)

(3) 環境: 宇宙中的星系碰撞都是星系對碰撞，發生 3 個星系同時碰撞的機率很低，因此我的模擬都是假設星系碰撞發生時於無其他天體重力場干擾。

3. 碰撞方法

宇宙中的星系碰撞方法有很多種，經過我的分析，主要分為直接碰撞(Direct Collision)與間接碰撞(Indirect Collision)

a. 直接碰撞

直接碰撞發生於撞擊參數(impact parameter)為零之狀況，軌跡為直線。

b. 間接碰撞

間接碰撞發生於撞擊參數(請參考 5.之(3))(impact parameter)不為零之狀況，軌道為曲線。

² 從 The Major and Minor Galaxy Merger Rates at $z < 1.5$ 得知星系的平均碰撞週期為 80~90 億年

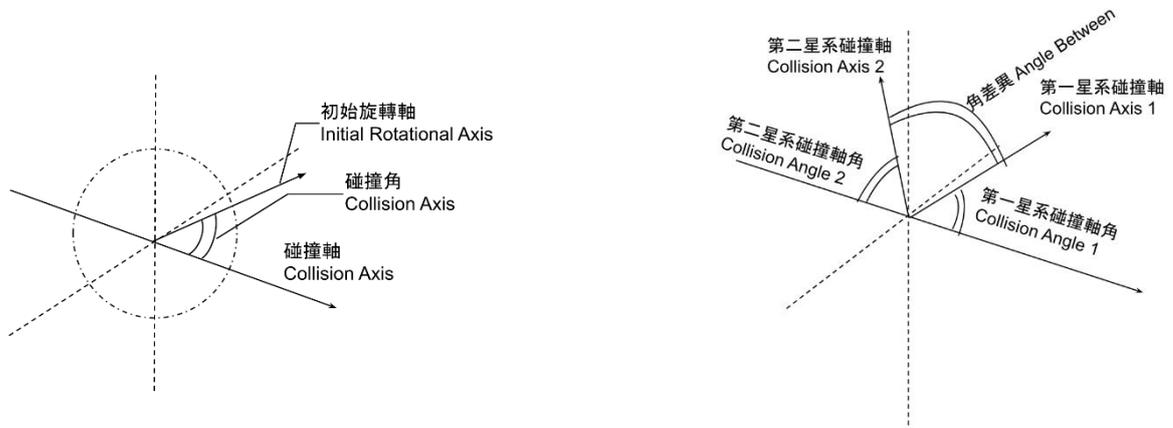
4. 黃金比例均勻分布法(golden ratio distribution method)

星系之碰撞由兩個角度構成(可見圖(四))，分別是碰撞角 Collision Angle(初始旋轉軸與碰撞軸間的夾角)與角差異 Angle Between(初始旋轉軸之間的角度)。

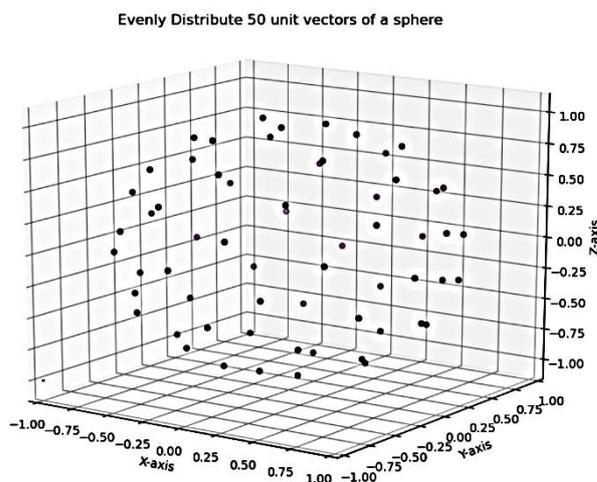
我的研究有一大部分是探討碰撞完後的機率分佈等問題，因此均勻的分佈初始狀況非常重要。

若要探討星系碰撞後的一些機率，就要保證碰撞前角度組合是均勻的，因此我用黃金比例均勻分布法來分佈 n 個向量(旋轉軸)於球面上。

例如圖(五)即為均勻的分佈 50 個向量於球面上



圖(四): 碰撞角、角差異。



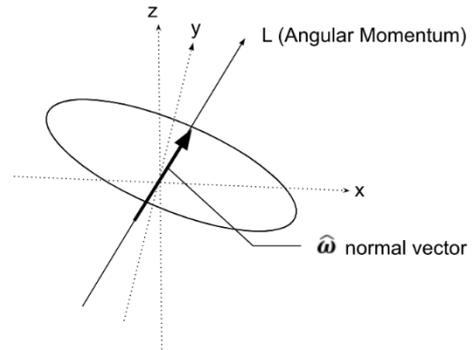
圖(五): 均勻分布 50 個點於球面上

5. 名詞與參數之定義:

天文物理中的參數主要是針對「觀測」加以定義，為能更明確的描述星系性質，本研究定義下列 7 項新參數，使模擬可分析星系中單一星點的位置、速度等。

(1) 星系旋轉軸

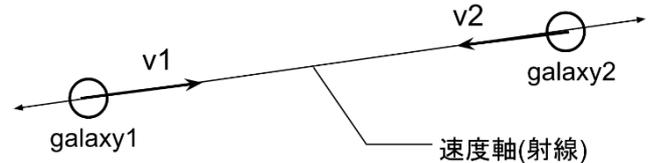
星系旋轉軸的定義為角動量向量的法向量 $\hat{\omega}$ (圖(六))。



圖(六): 角動量法向量

(2) 星系速度軸 (速度向量)

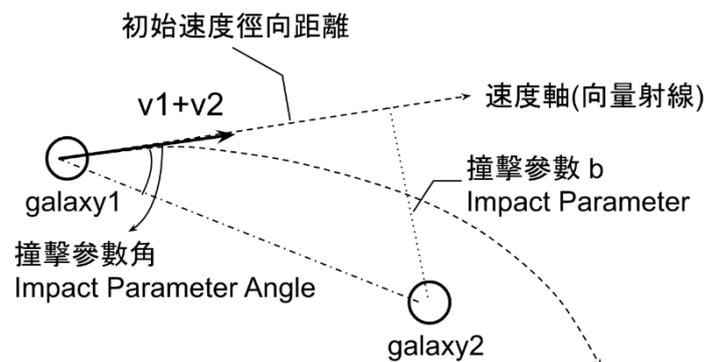
星系速度軸的定義為平行碰撞方向射線 (圖(七))。



圖(七): 速度軸

(3) 撞擊參數 Impact Parameter

撞擊參數 (b) 的定義為拋射體的速度向量與標靶物體質心的垂直距離(圖(八))。



圖(八): 撞擊參數

(4) 星系軸向量

由於碰撞出來的星系皆為橢球(Ellipsoid)形，本研究寫出一套演算法（例如：星系密度量化分析、最小平方法來擬合）來求出橢球相關性質，如橢球的三個長軸以及旋轉矩陣。

星系軸向量的定義：演算法擬合後的軸向量，藉由此向量可推斷星系軸分佈與

一些星系性質。在此延伸橢圓形軸長定義法，定義橢球最長軸為半長軸(Semi-Major Axis)，第二長軸為半短軸(Semi-Minor Axis)，最短的軸為短軸(Minor Axis)。

(5) 星系核盤比(扁率) (Disk-Bulge Ratio)

本研究的星系核盤比由橢球演算法算出的三個軸中最短除以最長，此計算法同時使用於螺旋星系與橢圓星系。

$$\text{Disk Bulge Ratio} = \frac{\text{Minimum Axis Length}}{\text{Maximum Axis Length}}$$

當星系核盤比越小，表示越扁，也就是越接近一螺旋星系；相對地當星系核盤比越大，表示越接近橢圓星系(Elliptical Galaxy)。

(6) 速度離散 (Velocity Dispersion)

速度離散的定義為碰撞後星系所有物質速度的離散程度，由速度的標準差算出。

$$\text{Velocity Dispersion } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (v_i - \mu)^2}{N}}$$

速度離散在天文學中是一個非常重要的數值，可由維里定理推算天體質量。

(7) 角動量同化度(Degree of assimilation of Angular Momentum)(DAA)

當角動量受到力矩作用時，會產生進動(precession)的現象，進動率(precession rate)(ω)的定義為:

$$\omega = \frac{\tau}{L} = \frac{\text{Torque}}{\text{Angular Momentum}}$$

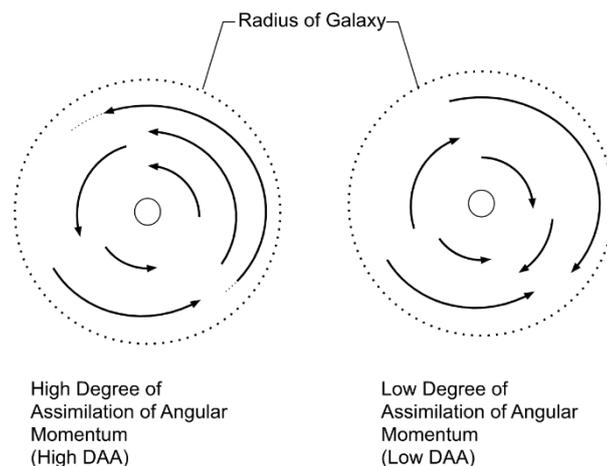
若一星系內角動量集中率低，將使其在受其他物體重力影響時，進動率不同，使其旋轉雜亂。

因此我定義:

$$L = I\omega = \sum_{i=1}^n m_i r_i \times v_i$$

$$\omega = \frac{\|L_a\|}{s} = \frac{\left\| \sum_{i=1}^n m_i r_i \times v_i \right\|}{\sum_{k=1}^n \|m_k r_k \times v_k\|}$$

$$= \frac{\|L_a \hat{i} + L_a \hat{j} + L_a \hat{k}\|}{s}$$



$$DAA = \frac{\omega}{s} = \frac{\left\| \sum_{i=1}^n m_i r_i \times v_i \right\|}{\sum_{k=1}^n \|m_k r_k \times v_k\|} = \frac{\text{角動量}}{\text{各角動量之純量合}} \quad (\text{無因次})$$

DAA 的意義在於，當 DAA 越大，表示星系內渾沌運動的星體少，進動率一致，結構較穩定。一般的螺旋星系 DAA 大約等於 0.05，橢圓星系 DAA 更小，因為他們無明顯旋轉軸。(註:當 DAA 等於 1 時，表示其為剛體)

參、實驗結果與討論

(一) 初始環境(Initial Condition)的設定

1. 星系的組成 (Components of initial Galaxies)

螺旋星系的物質的分佈分別為<核物質-盤面物質-暗物質>，組成的比例設定下:

	星際物質種類 (Stellar Object Type)	數量 (個)	質量 (unit) ($5 \times 10^{10} \text{ solar mass}^3$)	小計 (unit)	占總質量百分比 (%)
1	Disk Particle 螺旋星系盤面物質	5000	0.0002 units	1 unit	16 %
2	Bulge Particle 螺旋星系核物質	2000	0.000125 units	0.25 Unit	4 %
3	Halo particle (Dark Matter)	10000	0.0005 units	5 unit	80 %

³ Solar mass (太陽質量) 大約為 1.981×10^{31} 公斤，此處的單位為 5×10^{10} 個太陽質量。

	暗物質 ⁴ 物質				
總和	3 種 質量比: 4:1:20 數量比: 5:2:10	17000 個		6.25 units	100 %

結構及內部參數設定如下:

半徑 Radius	18.94
核盤比 Disk-Bulge Ratio	0.2193 (21%)
DAA	0.1866
速度離散	67.97619 km/s

2. 星系密度分布 (Density Distribution of Initial Galaxies)

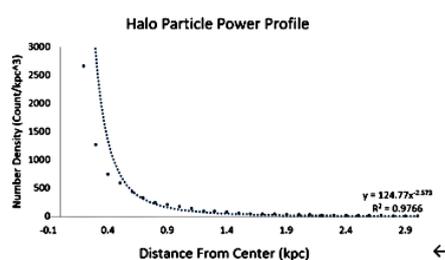
星系的密度分布主要由內到外密度越來越小，與現今使用電波望遠鏡觀測到的實際星系相符。

(1) 盤面物質的分佈密度隨與星系核心的距離呈指數關係降低(圖(九))。

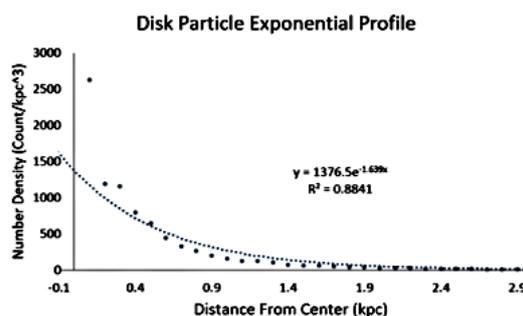
(2) 指數性星系盤特徵 Exponential Disk Profile。

密度隨指數下降(圖(十))。

(3) 暗物質與核物質密度分布與半徑成乘冪關係(圖(十一))。

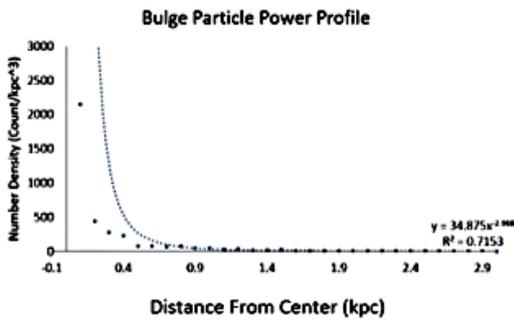


圖(九)、暗物質密度分布圖



圖(十): 盤物質密度分佈

⁴ 暗物質(dark matter halo) 分布於星系外層的暗物質粒子，使星系擁有 Rotation Curve 現象之因子

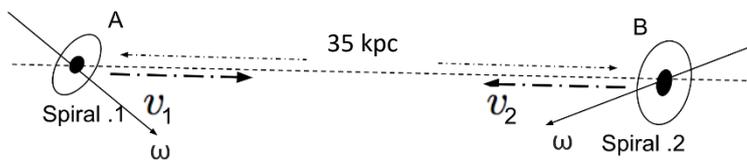


圖(十一): 核物質密度分佈

(二)直接碰撞 Direct Collision

1. 同質量，自無限遠不同旋轉軸向之星系碰撞

設計此組實驗目的在於求出不同旋轉軸向之星系，在無外在引力的作用下從無限遠開始受到重力牽引開始加速，重力位能轉變為動能，然後碰撞的結果。



(1) 初始速度設定

若將模擬的星系真的放置於無限遠，則此模擬需時將⁵接近無限久。因此我將兩星系質心距離從無限遠處拉近至 35kpc 處，此距離大約是星系半徑的 2 倍，這樣的距離使星系還未大幅度進動就碰撞了，因此旋轉軸角在碰撞瞬間不會與原本的相差太大。

進一步推導兩星系至距離 R 時的相對速度為:

$$v_R = \sqrt{\frac{2G(M_1 + M_2)}{R}}$$

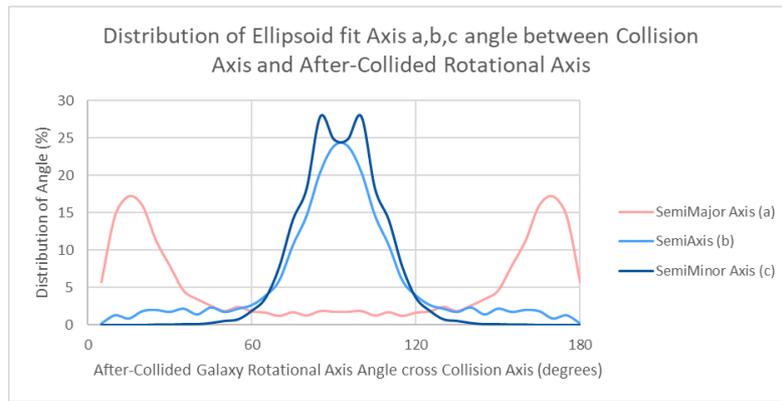
由此推算出相距 35kpc 之等質量星系之相對速度為 -1.5801km/s(相向)。

⁵ 經過計算，兩物體自無限遠釋放到最後碰撞需時 $T = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{R^3}{Gm}}$ 秒，若將 $R \rightarrow \infty$ ， $T \rightarrow \infty$

(2) 模擬結果

a. 碰撞後軸向之分析:

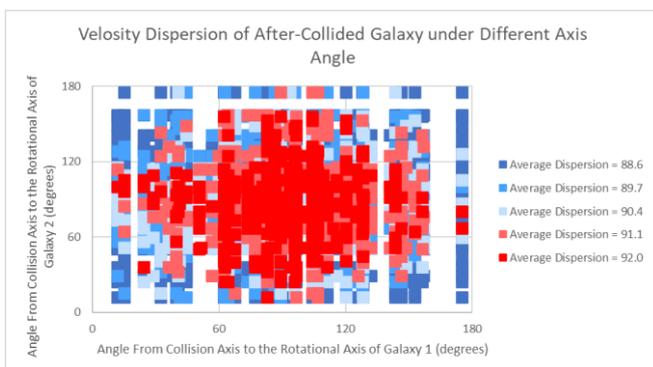
星系旋轉軸在初始狀況下呈現均勻分佈，但本研究發現碰撞完後的三軸發生了聚集在某一特定區域的現象。經過歸納半長軸、半短軸、以及短軸後，本研究發現半短軸與短軸的分部集中於接近距離碰撞軸 90 度之處；其中 85%的短軸與 69.5%的半短軸分佈於距離碰撞軸 70~110 度之處。而半長軸的分部相反，主要集中於碰撞軸附近和與之 180 度之處；其中 72%分佈於與碰撞軸距離 < 30 度與 > 150 度之處（圖（十二））。



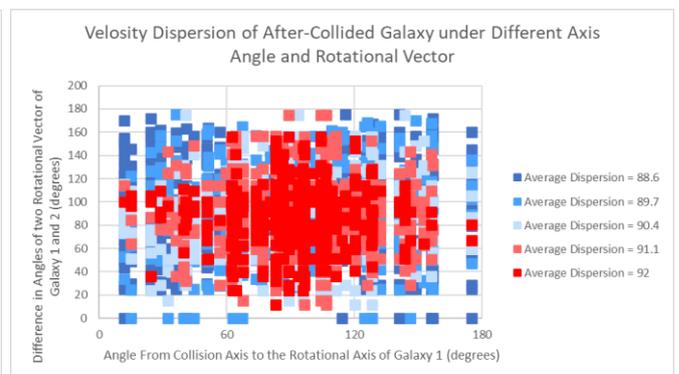
圖（十二）：半長軸、半短軸、以及短軸的分佈圖

b. 碰撞後速度離散分析

經過分析，本研究發現要產生高速度離散的星系，兩星系初始旋轉軸需與速度軸成 90 度，兩星系間的旋轉軸角也須差 90 度(如圖（十三）、圖（十



圖(十三):產生不同速度離散之星系碰撞角組合；橫軸為第一星系碰撞角，縱軸為第二星系碰撞角。



圖(十四):產生不同速度離散之星系碰撞角與角差異組合；橫軸為第一星系碰撞角，縱軸為角差異。

四))。

本研究也發現速度離散的分佈大部分介於 89km/s 度到 93km/s 之間 (圖 (十五)), 呈現「常態分佈」(normal distribution) (圖 (十六))。

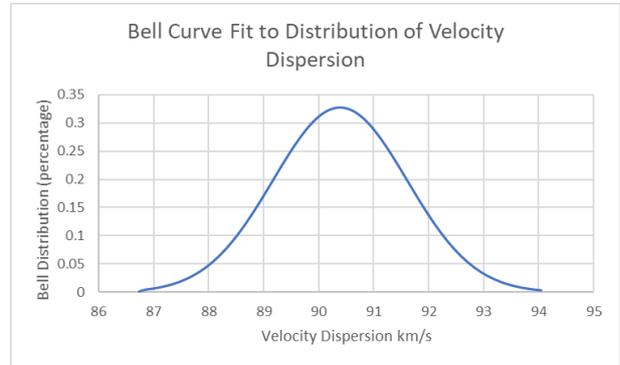
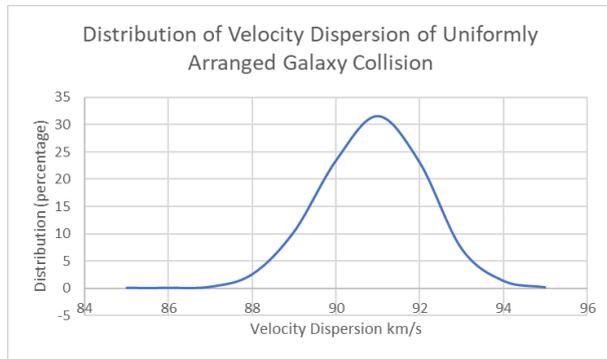


圖 (十五): 速度離散分佈圖, 橫軸為離散值, 縱軸為趨勢

圖 (十六): 以常態分佈曲線進行擬合的 Bell Curve

c. 碰撞後 DAA 分析

星系在碰撞後雜亂程度提升, 因此 DAA 的數值皆下降, 其中大部分(98%) 處於 0.06 以下 (圖 (十七)); 我分析 DAA > 0.06 的星系組合, 發現要產生 DAA > 0.06 的碰撞星系, 兩星系各自與碰撞軸的角度需一樣, 分佈區域如圖 (十八), 探討 DAA 時不必考慮兩初始旋轉軸角度差, 因為其沒對 DAA 造成太大影響。

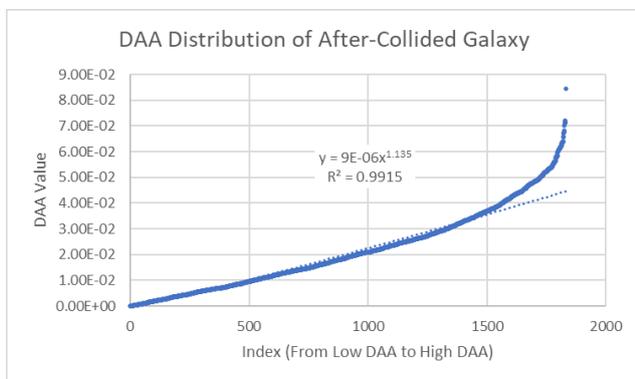


圖 (十七): 碰撞後的 DAA 分佈圖, 橫軸為由 DAA 小到大排列的 index, 縱軸為由小到大排列的 DAA

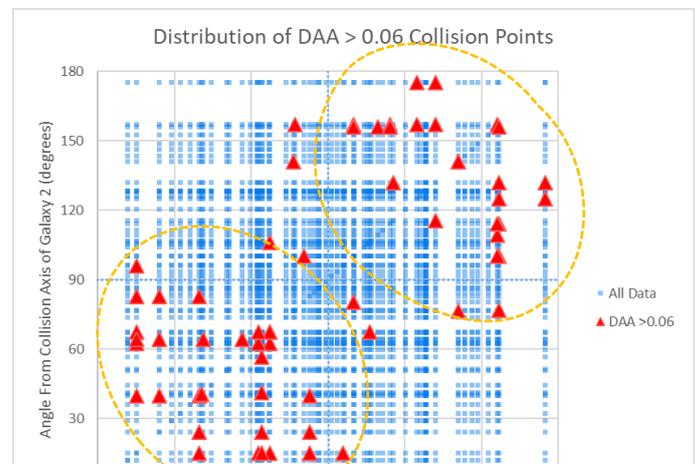
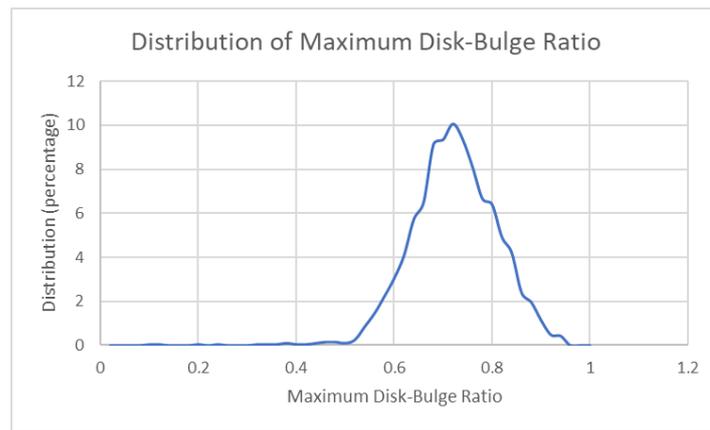


圖 (十八): 產生 DAA > 0.06 的組合圖, 藍色為所有的碰撞資料, 紅色為 DAA > 0.06 的碰撞點; 此圖橫軸為第一星系碰撞角, 縱軸為第二星系碰撞角。

d. 碰撞後核盤比分析

經過分析，本研究發現角度直接的影響星系碰撞後的星系型態，尤其是核盤比。碰撞後星系的核盤比如圖（十九）所示，其集中於 0.6~0.8 之間，與初始核盤比（0.21）相差甚廣。



圖（十九）：核盤比之分佈圖；橫軸為核盤比，縱軸為分佈

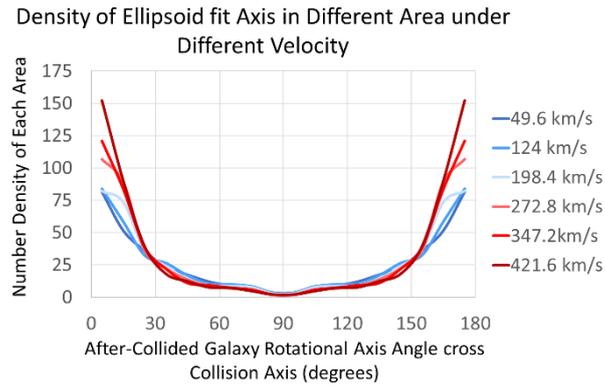
2. 同質量，不同初速，不同旋轉軸向之星系直接碰撞

為進一步探討初速是否會改變旋轉軸對星系碰撞的結果，這階段的模擬均以質心距 35kpc,撞擊參數等於零為固定條件，產生了 50 個碰撞點(galaxy type)，1275 組的碰撞；並以速度為變因，並以 7 種瞬時碰撞相對速度進行模擬。

其中第八組速度為 496km/s 碰撞之星系直接穿越過去，此暫不考慮穿越之狀況。

a. 碰撞後軸向之分析

經過分析，本研究發現不同速度系的碰撞亦有分佈不均的性質，其中初始速度越大，碰撞出的星系長軸分佈向外擴散；分佈於 90 度處之星系越來少，0 度與 180 度之分佈越來越多（圖（二十））。

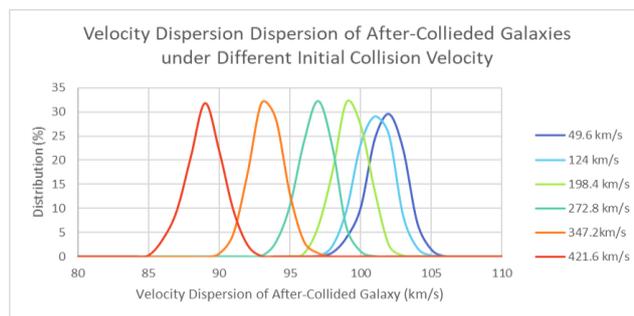


圖（二十）：不同初速下碰撞出星系半長軸分佈；橫軸是碰撞後星系長軸與碰撞軸間的角度，縱軸是分佈，顏色越宏代表初始速度越大。

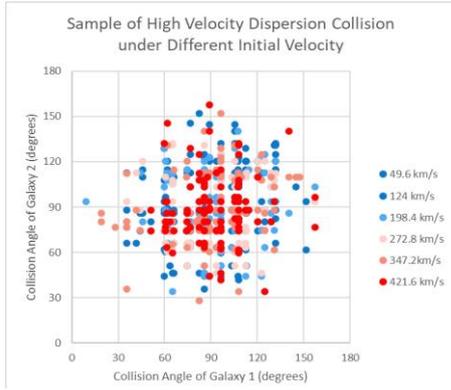
b. 碰撞後速度離散分析

本研究也發現整體來說速度的離散值分佈狀態不隨速度改變，其分佈卻隨著初始速度的上升而下降（圖（二十一））。

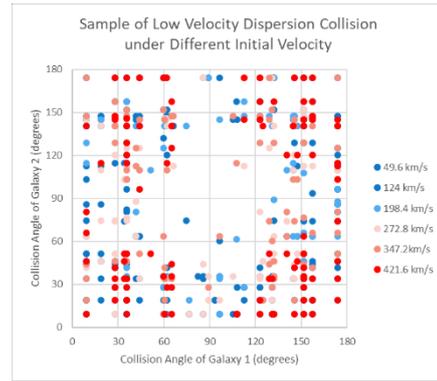
前文曾描述星系速度離散與角度之關係（圖（十三）、（十四）），現比較不同速度下是否仍存在此關係。因此，我分析各種碰撞下速度離散值最大 10% 以及最小最大 10% 之碰撞點分佈（圖（二十二）、（二十三）、（二十四）、（二十五））；其中，我發現其分佈不會速度不同而改變，可證實星系初始角度在不同速度下仍會影響 DAA，不受「速度」變因影響



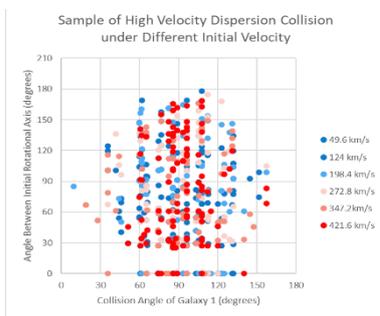
圖（二十一）：不同初速下碰撞出 DAA 分佈；橫軸為速度，縱軸為平均



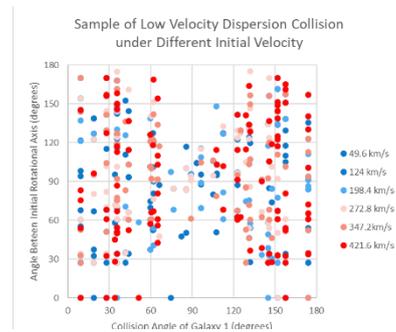
圖(二十二): 不同初速下碰撞出高速度離散(前 10%)之初始角分佈; 橫軸為第一個星系之碰撞角, 縱軸為第二個星系之碰撞角。



圖(二十三): 不同初速下碰撞出低速度離散(後 10%)之初始角分佈; 橫軸為第一個星系之碰撞角, 縱軸為第二個星系之碰撞角。



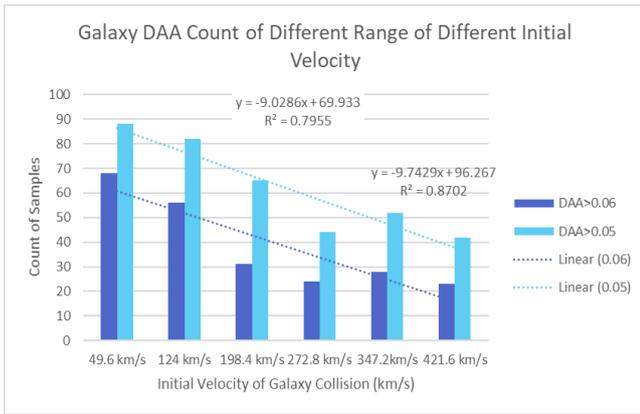
圖(二十四): 不同初速下碰撞出高速度離散(前 10%)之初始角分佈; 橫軸為第一個星系之碰撞角, 縱軸為初始旋轉軸差角



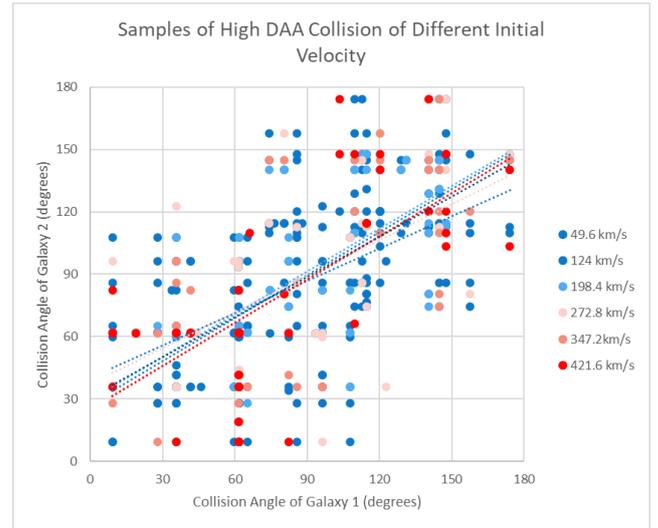
圖(二十五): 不同初速下碰撞出低速度離散(後 10%)之初始角分佈; 橫軸為第一個星系之碰撞角, 縱軸為初始旋轉軸差角

c. 碰撞後星系 DAA 分析

我發現若宇宙中隨意挑選兩初始星系進行碰撞, 隨著碰撞前初始相對速度增加, 碰撞後產生高 DAA 的機率越小(圖(二十六))。其中, 我再分析產生高 DAA 之碰撞點分佈, 並發現其組合方法不隨速度變化而變(圖(二十七)), 其分佈相似於圖(十八)。



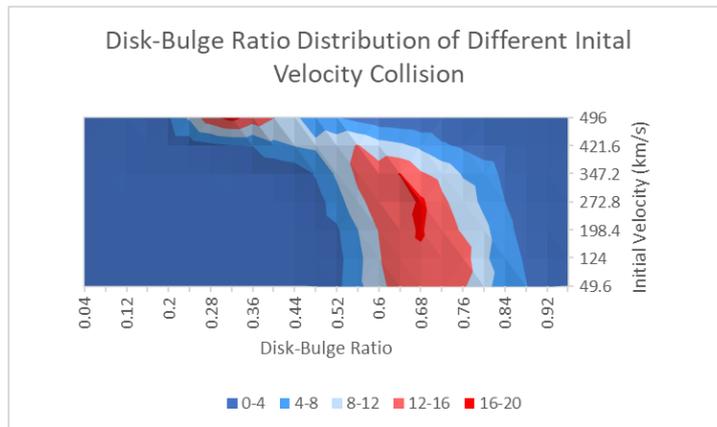
圖(二十六): 不同速度下碰撞出的高 DAA 數量; 深藍色為 DAA>0.06 之數量, 淺藍色為 DAA>0.05 之數量 (不包含 DAA>0.06); 橫軸為速度, 縱軸為數量。



圖(二十七): 不同初速下碰撞出高 DAA (前 10%) 之初始角分佈; 橫軸為第一個星系之碰撞角, 縱軸為第二個星系之碰撞角。

d. 橫撞後核盤比分析:

本研究發現星系碰撞後的平均核盤比與分佈隨著速度的增加而下降 (圖(二十八)), 也就代表高速的碰撞容易形成低核盤比星系。



圖(二十八): 不同初始速度碰撞出的核盤比分佈; 其中橫軸為核盤比, 縱軸為初始速度, 顏色深 (紅色) 代表高密度區, 顏色淺 (藍色) 代表低密度區。

3. 不同質量, 不同初速, 不同旋轉軸向之星系碰撞

在此模擬, 我挑選了 15 個碰撞點(galaxy type), 共 120 種組合進行碰撞。其中質

量比⁶由 M:m=1:1 到 M:m=8:1 (共八種), 初速由 0.2 unit 到 1.2 unit⁷ (共六種)。這樣模擬是因為在宇宙中的星系碰撞並非與理論二體問題一樣 (一種質量比只有一種碰撞速度), 而是受到其他引力源影響; 因此同一質量比的星系可能演化出不同的碰撞速度。此部分以 Galaxy Type、質量比、初始速度為操縱變因, 進一步探討質量比搭配初始速度如何影響星系碰撞的結果。

在閱讀完 Scaling Relations of Mass, Velocity and Radius for Disk Galaxies 後, 我以此文歸納出的螺旋星系質量(M)與速度(v)、半徑(R)之關係將模擬的的星系放大或縮小。

(1) $M \propto v^4$ 速度正比於質量的 $\frac{1}{4}$ 次方

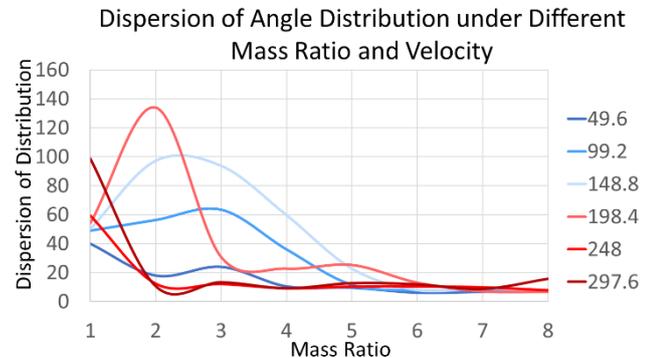
(2) $M \propto R^2$ 半徑正比於質量的 $\frac{1}{2}$ 次方

a. 碰撞後軸向之分析:

經過分析, 本研究發現碰撞後星系長軸分佈與速度、質量同時有關:

本研究也發現(圖(二十九)):

- (a) 當速度從 0.2 unit(49.6km/s)到 0.4 unit(99.2km/s)時, 初始質量比介於 1~4 之間的碰撞有半長軸分佈不均的特性⁸。
- (b) 當速度從 0.6 unit(148.8km/s)到 0.8 unit(198.4km/s)時, 初始質量比介於 1~4 之間的碰撞仍有半長軸分佈不均的特性, 而質量比介於 3 到 2 之分佈不均勻情況最為顯著。



圖(二十九):不同質量、初速碰撞後之半長軸分佈; 其中橫軸為質量比, 縱軸為離散程度, 顏色越紅代表初速越大。

⁶ 質量比的定義為大質量星系 M 與小質量星系 m 之比值 $MassRatio = \left(\frac{M}{m}\right)$

⁷ 這裡的速度由 49.6 km/s 到 297.6 km/s

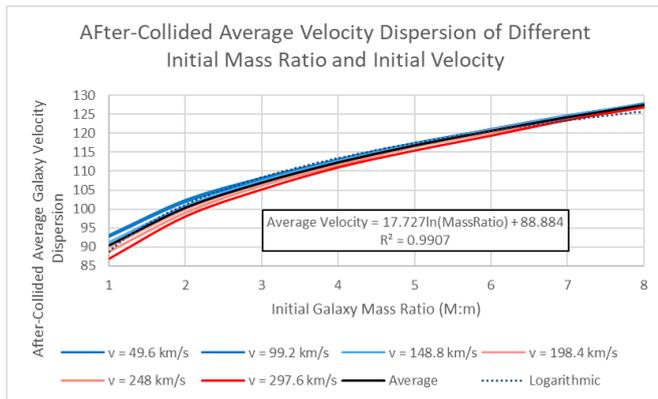
(v1=49.6km/s, v2=99.2km/s, v3=148.8km/s, v4=198.4km/s, v5=248km/s, v6=297.6km/s)

⁸ 此處「分布不均」代表著碰撞後半長軸有分佈於 0 度與 180 度之特性。

(c) 當速度大於 1.0 unit(248km/s)時，基本上只有質量比等於 1 時才會發生分佈不均的現象。

b. 碰撞後速度離散分析

經過分析，本研究發現初始相對速度對於速度離散的影響相較於質量比小，質量比的增加造成速度離散亦增加(圖(三十))；本研究亦歸納出不同質量、速度的搭配下角度對速度離散之多元回歸(圖(三十一))。



圖(三十):不同初始速度與質量比之組合下的平均速度離散關係；其中橫軸為質量比，縱軸為平均速度離散，顏色越紅代表速度越大。

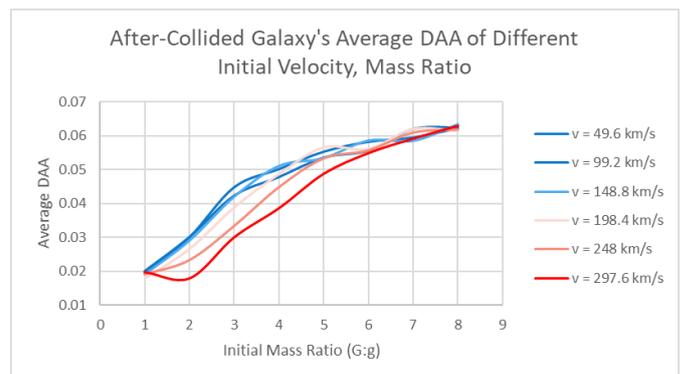
R-Square = 0.95	Value	P-Value
Intercept	92.84829	0
Angle Between	-0.0017	0.029396
Velocity	-0.01089	6.2E-143
Mass Ratio	5.019735	0
Collision Angle (M)	-0.03165	3.93E-85

圖(三十一):使用統計學多元線性回歸(Multiple Regression Analysis)分析:

1. 初始角度差、2. 初始速度 3. 質量比 4. 初始大質量星系旋碰撞軸角之餘角(由於對稱)

c. 碰撞後之 DAA 分析

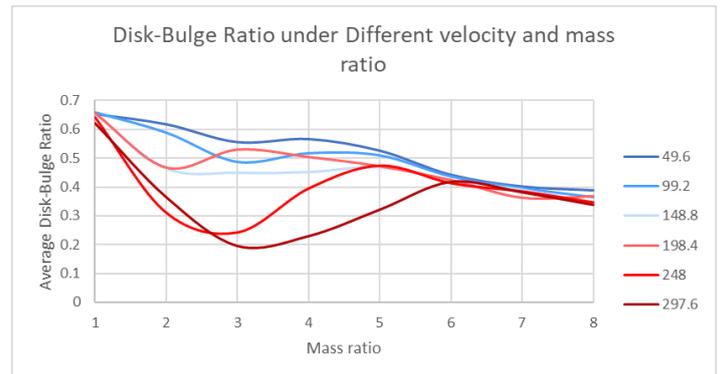
質量比相較於初始速度對星系 DAA 的影響大；其中，當質量比等於 1 時，不管速度為何 DAA 均在 0.02 左右，同樣的當達到質量比大於 6 時，不管速度的量值為多少，碰撞出之平均 DAA 大約在 0.06 左右；這代表著速度只在質量比介於 2 到 5 之間時才有顯著的影響(圖(三十二))。



圖(三十二):星系在不同速度、質量比組合下的平均 DAA；其中橫軸為質量比，縱軸為平均 DAA，顏色越紅代表初始相對速度越大。

d. 碰撞後之核盤比分析:

質量與速度對核盤比的影響並非線性；其中發生核盤比極小值是當速度 $\geq 248\text{km/s}$ ，質量比介於 2 與 5 之間(圖(三十三))。



圖(三十三):星系在不同速度、質量比組合下的平均核盤比；其中橫軸為質量比，縱軸為平均核盤比，顏色越紅代表初始相對速度越大。

(三) 間接碰撞 Indirect Collision

在模擬完直接碰撞後，發現由直接碰撞撞

出低核盤比之螺旋星系機率低，因此再利用星系盤面角度當作變因，探討角度如何影響螺旋星系的碰撞。

此實驗中我模擬了兩次，分別探討

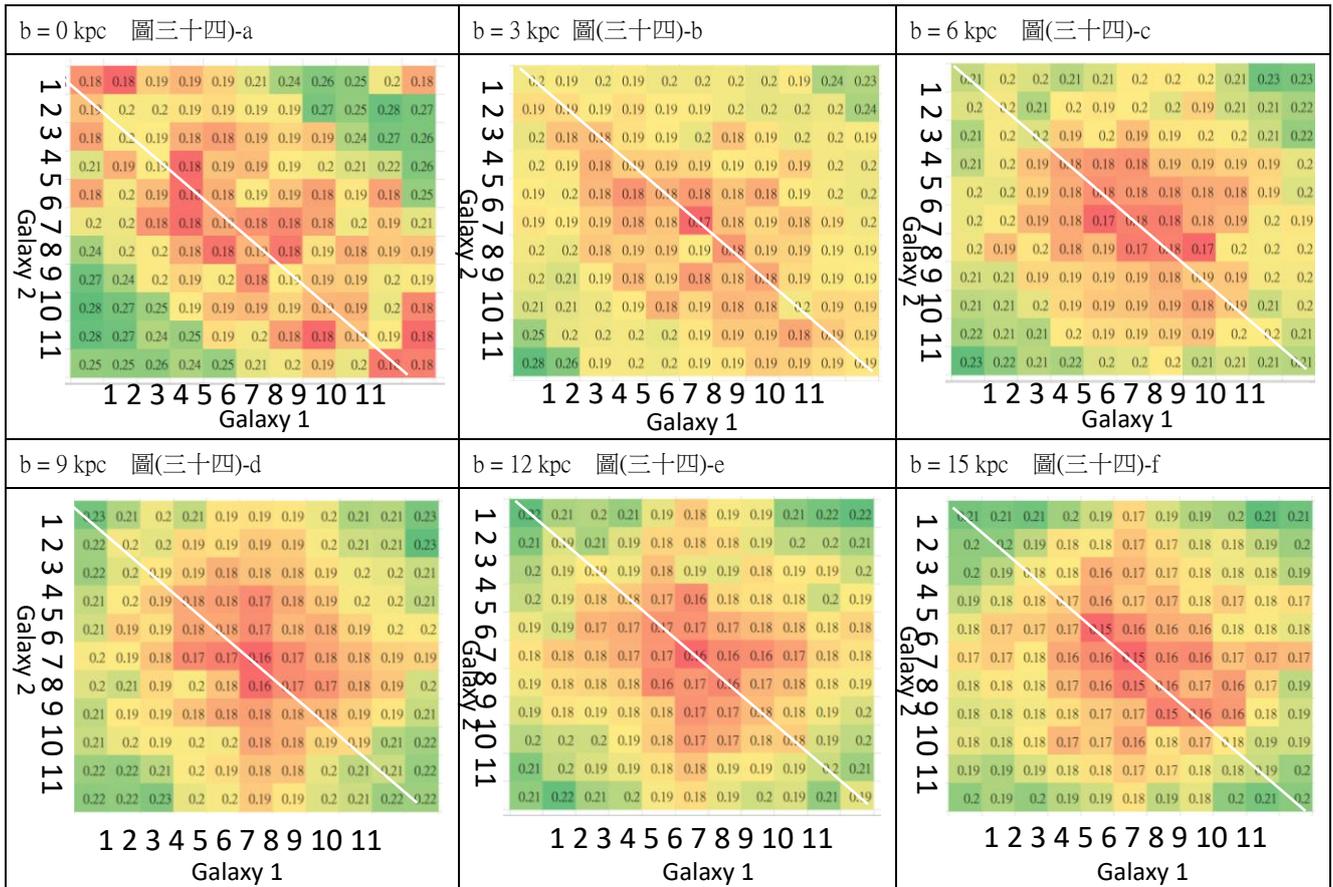
1.產生非均勻資料點並進行碰撞:

將兩星系以徑向距離 $3R$ ，撞擊參數 impact parameter (b)由 $0\sim 6/6$ 並採用 11 個資料點(非均勻)(Galaxy Type)，其分佈從與速度軸承 -90 度至 $+90$ 度(可見表(一))進行模擬，試討論如何碰撞出低核盤比星系。

2.產生均勻資料點並進行碰撞:

將兩星系以徑向距離 $3R$ ，撞擊參數 impact parameter (b)由 $0\sim 2.8$ 並採用 20 個資料點(非均勻)(Galaxy Type)，試討論碰撞出星系性質。

1. 產生非均勻資料點並進行碰撞



圖(四十八)-a,b,c,d,e,f: 不同撞擊參數下，Galaxy1 與 Galaxy2 碰撞後之核盤比分佈。顏色越紅代表核盤比越小。

根據模擬結果得知，要形成螺旋星系的三個有利因素:

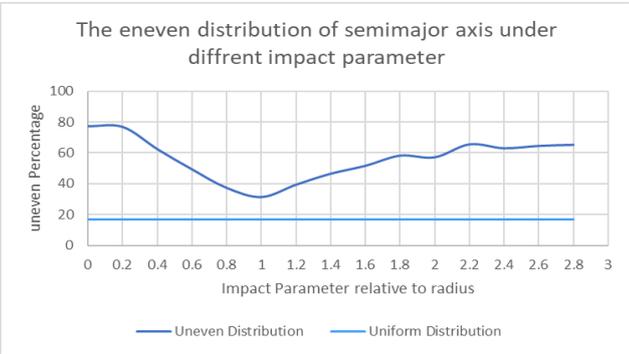
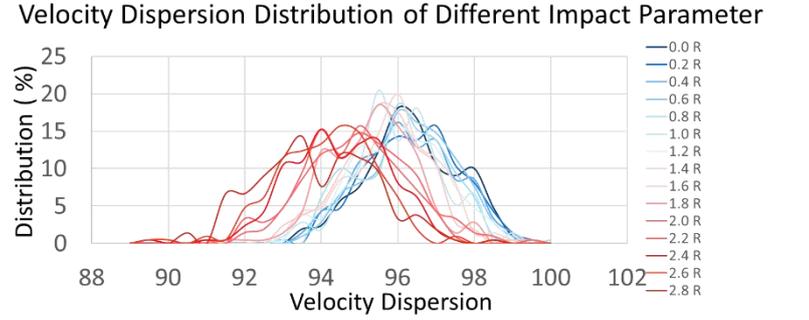
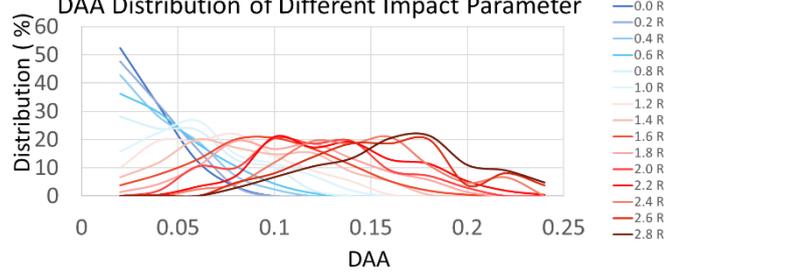
1. 初始旋轉軸相近:碰撞後速度場相似
2. 初始旋轉軸越接近速度軸: 旋轉軸平行於速度軸較容易隨著碰撞而傳遞。
3. 撞擊參數大: 減緩星系質心直接碰撞的速度，先利用盤面的碰撞來消耗部分能量，再進行質心碰撞。如(圖(五十一)-c)，碰撞瞬間先以盤面來減速。

galaxy type	Angle (deg)
1	-90
2	-72
3	-54
4	-36
5	-18
6	0
7	18
8	36
9	54
10	72
11	90

表(1)

2. 產生均勻資料點並進行碰撞:

a. 碰撞後軸向之分析:

<p>a. 碰撞後軸向之分析</p>	<p>碰撞後星系長軸分佈之特性仍然顯著，但是當撞擊參數約等於半徑時，此分布較不明顯(圖(三十五))。</p>	 <p>圖(三十五):不同撞擊參數下之長軸分佈不均情形；其橫軸是撞擊參數，縱軸是長軸分佈情形</p>
<p>b. 碰撞後速度離散之分析</p>	<p>當星系之撞擊參數增加，速度離散值下降，分布不變(圖(三十六))。</p>	 <p>圖(三十六):不同撞擊參數下之速度離散分佈；其橫軸是撞擊參數，縱軸是速度離散分佈</p>
<p>c. 碰撞後 DAA 之分析</p>	<p>當星系撞擊參數增加，碰撞後 DAA 有增大的趨勢；而在此分佈中在 0.8R 處有明顯分布差異(圖(三十七))。</p>	 <p>圖(三十七):不同撞擊參數下之 DAA 分佈；其橫軸是撞擊參數，縱軸是 DAA 分佈情形</p>

<p>d. 碰撞後核盤比之分析</p>	<p>當星系撞擊參數增加，碰撞後核盤比會下降(圖(三十八))。</p>	<p style="text-align: center;">Maximum, Average, Minimum, SD of Disk-Bulge Ratio under Different Impact Parameter</p> <p style="text-align: center;">圖(三十八):不同撞擊參數下之核盤比分佈；其橫軸是撞擊參數，縱軸是核盤比分佈情形</p>
---------------------	-------------------------------------	---

肆、結論與應用

(一) 實驗結論

1. 直接碰撞

(1)單變因模擬

a.角度

(a)若要碰撞出低核盤比之星系(相似於螺旋星系)，初始碰撞角皆需為 0 度或 180 度，而初始角差異較無影響。

(b)若要碰撞出高 DAA(高穩定度)之星系，初始碰撞角需相似，而初始角差異較無影響。

(c)要碰撞出低速度離散之星系，初始碰撞角皆需為 0 度或 180 度，而初始角差異亦須為 0 度或 180 度。

(2)雙變因模擬

a. 角度與初始相對速度

(a)初始相對速度越大，碰撞後產生的核盤比、速度離散越小，產生高 DAA 星系機率也越小。

(b)速度大小並不改變「角度」這個變因對整體星系結構的影響。

(c)長軸分佈不均之狀況在不同的速度下仍是存在。

(3)三變因模擬

a. 角度、質量比、速度

(a)碰撞後的星系性質是由大質量星系的角速度決定。

(b)質量比越大，碰撞出的星系 DAA 與速度離散越大。

(c)發生核盤比最低之處在於當速度等於 297.6 且質量比等於 3 時。

2. 間接碰撞

a. 撞擊參數與角度

(a)撞擊參數增加後速度離散值以及平均核盤比均下降。

(b)撞擊參數增加後碰撞後 DAA 有增大的趨勢；而在此分佈中在 $0.8R$ 處有明顯分布差異。

(c)碰撞後長軸分佈不均之特性在核盤比介於 $0.6R$ 與 $1.4R$ 間較不明顯。

(二) 應用與未來展望

1. 應用

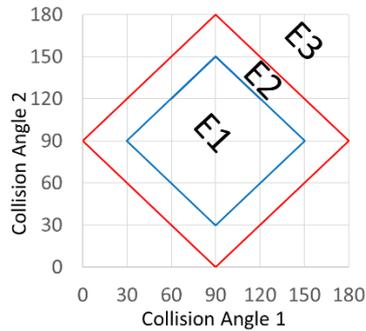
(1)可預測星系碰撞後的模型或判斷碰撞前星系行為：

利用本文探討的變因加上目前的星系碰撞模型，將可使未來預測星系碰撞結構或判斷碰撞前星系的機制更精準。

(2)建立新的星系分類系統：

本文提出星系碰撞再加上旋轉軸的因素後產生新的星系分類法，融合哈伯星系分類序列以及 major minor merger 定義界線，使星系分類法具量化基礎(圖

(三十九)、表(二))。



Galaxy Type	Disk-Bulge Ratio (Flattening)	Angular Relation
Type 1 (E1)	DBR > 0.5	$C1 + C2 < 30.35$
Type 2 (E2)	$0.5 > DBR > 0.4$	$30.35 < C1 + C2 < 60.29$
Type 3 (E3)	$0.4 > DBR > 0.3$	$60.29 < C1 + C2$

表(二) 本研究建議之星系碰撞分類法

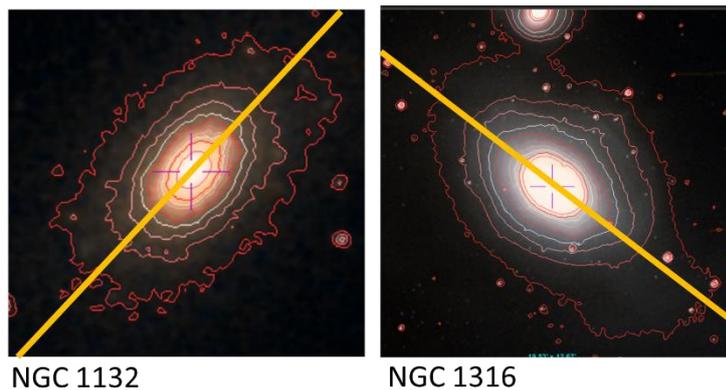
(3) 估計橢圓初始星系碰撞軸：

目前針對橢圓星系如何形成的假說主要有二：

- a. 橢圓星系是由螺旋星系碰撞而構成
- b. 橢圓星系是由宇宙中的物質凝聚而成

目前在天文物理中是比較偏向橢圓星系是由螺旋星系碰撞而構成；若此假說成立，再搭配上文所述螺旋星系碰撞後產生之長軸分佈於碰撞軸兩側，本研究就可以找出橢圓星系碰撞軸所在的平面。

其中，有 83% 之 major merger 有明顯選轉軸，因此此方法可以用於 83% 之橢圓星系(圖(四十))。



圖(四十):橢圓形系 NGC 1132 與 NGC 1316，黃色的限為預估的碰撞平面。

2.未來展望

(1) 變因的延伸

本文之討論範圍僅限於螺旋星系之碰撞，未來可將此研究方法推廣至棒旋星系，更完整的探討星系碰撞。

(2) SFR 的探討

除了本研究提到的 DAA、Disk-Bulge Ratio，另一個重要的星系性質是 SFR(Star Formation Rate)，這個參數與氣體、溫度有關，也是本研究未來的一個研究方向。

伍、參考資料

(一) ‘Smoothed Particle Hydrodynamics’ (2020). Wikipedia. Available at

https://en.wikipedia.org/wiki/Smoothed-particle_hydrodynamics

(二) Jennifer et al.(2011). ‘The Major and Minor Galaxy Merger Rates at $z < 1.5$ ’
arXiv:1108.2508

(三) Earl Schulz(2017). ‘The Astrophysical Journal, Scaling Relations of Mass, Velocity and Radius for Disk Galaxies’

(四) Evenly Distributing n Points in a Sphere

<https://stackoverflow.com/questions/9600801/evenly-distributing-n-points-on-a-sphere>

(五) Workshop on N-body simulations

<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/rubensmachado/outros-1/simulacoes-de-n-corpos/NbodyTutorial.pdf>

(六) NEMO USERS and PROGRAMMERS GUIDE

<http://carma.astro.umd.edu/nemo/nemo.pdf>

(七) Galaxy merger histories and the role of merging in driving star formation at $z > 1$
arXiv:1411.2595

(八) ‘Hubble Sequence’ (2020).Wikipedia. Available at

https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_sequence

【評語】 160011

以 SPH 光滑粒子流體動力學加以模擬螺旋星系碰撞，包括以角度為單變因，並搭配相對速度、質量比以及撞擊參數等雙變因進行分析。建立「質量比」、「初始相對速度」、「初始旋轉軸角度差異」及「撞擊參數」等各項變因之對應條件。此研究工作相當紮實。如果能夠計算一些可與天文數據現象比對會更令人相信模擬的結果。