星系碰撞之電腦模擬實驗

李盈瑩、吳其玲、徐瑤芳、劉長怡

在偶然的機會中我們聽了一場有關電腦模擬與星系碰撞的說明，對於初次聽聞此知識的人來說，模擬星系碰撞聽起來十分有趣，我們也不例外；想要趁著這個機會學習一項嶄新的事物，並做出屬於我們自己的星系碰撞模擬。

而在物理學到分子動力學後，了解瀰散速度(也就是方均根速率或內部分布速度）的意義，而在模擬星系中是把星球當作質點來計算的，因此我們想將瀰散速度運用到星系的作用上，探討與星系作用的關係。

研究目的

利用樹枝狀碼（TREECODE）程式來模擬星系碰撞的過程，改變兩相同正面碰撞球狀星系的初始速度，與固定球狀星系的初始速度改變角度碰撞，討論對兩星系碰撞的影響，得出兩星系碰撞時相對速度、碰撞角度與瀰散速度的關係。

實驗器材

1. 個人電腦 Intel PII 350
2. 個人電腦 Intel PII 333 超頻到 PII 416
3. Red Hat 作業系統

（一）星系的碰撞與合併

牛頓萬有引力是星系碰撞和合併的要素，星系碰撞和合併有三個很重要的現象：潮汐摩擦力（tidal friction）、軌道衰敗（orbital

decay）、劇烈放鬆（violent relaxation）。潮汐摩擦力使發生碰撞的星系最終合併為一星系。Chandrasekhar 是最先把此摩擦力描述為力學摩擦力（dynamical friction）的人。就像浪潮會使船停下來一樣，當星系碰撞時，會受到對方的重力影響而使動能減少，速度變小。兩星系越接近，潮汐摩擦力就越大。即使兩星系相距幾倍星系直徑的距離，潮汐摩擦力仍會使星系發生形變，消耗軌道的能量。

軌道衰敗是潮汐摩擦力所導致的。就像人造衛星會因空氣阻力使它軌道半徑漸漸變小，最後落至地球；兩個互受對方潮汐力影響的星系會逐漸的縮小軌道，最後發生合併，新形成的星系會沿著一軌道運行。

在星系合併的最後階段，兩星系會產生快速的重力場變化使星系中的恆星重新分配位置，使恆星的方位達到新的平衡，這就叫做劇烈放鬆。

近十幾年，電腦模擬廣泛的被用來檢查這些星系間交互作用的過程，不只確定了潮汐摩擦力和劇烈放鬆的效率，更可知軌道衰落的比率。例如：兩星系運行軌道方向相同的會比方向不同的更快合併。要產生合併，星系的最初接觸速度必須小到一個程度使其碰撞後沒有多餘的能量逃脫出去。電腦模擬提供我們一個了解星系合併物理特性的方法，合併之所以會發生，是因為星系碰撞是非常沒有彈性的。在單一的碰撞中，高達 50 % 的軌道能量會轉變為星系間的內能。最後，由於潮汐力所被拉出的尾中的恆星具有很多角動量，使兩星系能夠陷入兩者質心而合併。

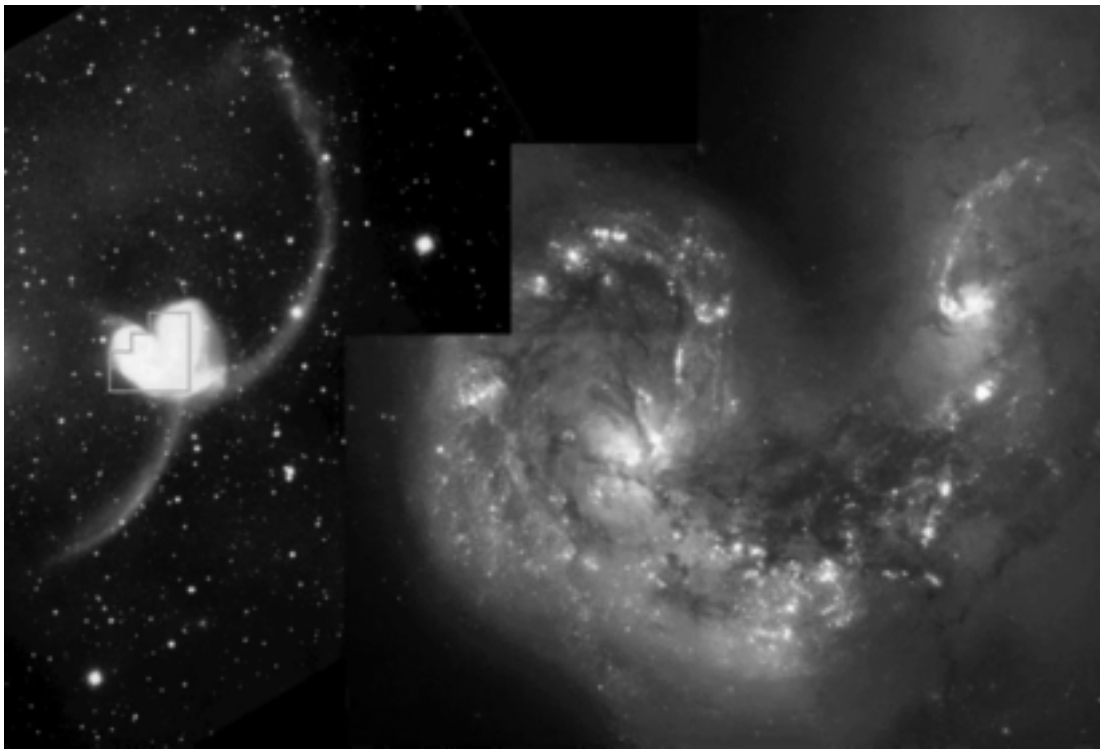
(二)球狀系統（Spherical Systems）的合併

在正面碰撞中，兩星系會因重力壓縮而導致衰落（decay），當星系試著分開時，會因重力壓縮受到比星系相距特定距離時更大一點的徑向力(axial force)。移動星系內的物質需花費軌道能量這過程會使其快速合併，即使是很集中的系統。在非徑向(off-axial)的碰撞中，星系中各質點的軌道運行方向會在碰撞時一致，而這些質點會接收旁邊的能量和角動能，再次移動到束縛較小的軌道，然後造成像尾一樣的結構。就各方面來說，受限制的星系對不可能永遠不發生合併。在一些情形中，衰落的時間也許很長，變得很難描述碰撞的最終結果（e.g. Navarro 1989）。

(三)星系碰撞的電腦模擬

銀河有許多種大小、形狀皆不同的星系，多數是有規則的結構，可歸類為橢圓及螺旋狀星系。螺旋星系呈現平坦且壓扁的碟狀，星系中所有的星星皆以同樣的方向，圍繞著同一個中心運行。橢圓星系則是團狀的，呈現出複雜的三度空間。這些規則星系有高度的對稱性，以及穩定度。不規則星系的本質則與規則星系有所不同。電腦模擬加上觀測所得的資料可以提供規則與不規則星系到底有何處相異的解答。我們已經得到不規則星系是由規則星系的互相碰撞所造成的。

電腦模擬首先可詮釋互動的一對螺旋星系。以一對螺旋星系而言，互動時可產生不一樣的形狀。因為絲狀結構（filamentary structure）是細微的，天文學家認為這種結構必是由電磁力或非引力之力所造成；但是 1972 年時 Alar 和 Juri Toomre 提出這種結構是因為潮汐力作用在盤面上的結果。他們把這些星系視作點質量（point mass），被測試質點包圍的點質量（point mass），然後可以由電腦模擬重建出這些星系。但由於 1972 年時的電腦空間不夠大，所以他們無法檢驗螺旋星系碰撞的長期演變，也就不能證實橢圓



由哈伯望遠鏡所攝得的碰撞星系 NGC4038 與 NGC4039，右圖為左圖中央區域的放大影像，圖中可以看見螺旋星系在碰撞時產生的絲狀結構。

星系確實是由螺旋星系合併而來的說法。

欲使模擬碰撞會近似於真正的兩螺旋星系碰撞，螺旋星系需要有核球、盤狀構造、球狀暈，其半徑需在10千秒差距之內，所有質點都在接近軌道面上，速度要像自無限遠處落下一樣。

(四)球狀星系的正面碰撞

1.在用N質點方法（詳見研究方法）模擬星系碰撞時，當兩個球狀星系經過正向碰撞，如果碰撞相對速度（後面以V表示）小於四倍內部速度分布（the internal velocity dispersion 相當於方均根速率；後面以σ表示），就會合併。

2.在球狀星系的正面碰撞模擬中，質量的轉移及損失，通常可以省略。

3.合併後的結果，顯示出合併後，質點會有集中的趨勢，但是外圍形狀更擴大。當V=4.1σ時，潮汐力的影響力最大。

研究方法

我們可以使用一組質點假設為所模擬的星系或星球，數目可由數千至數萬個，而它們之間以萬有引力互相吸引。但電腦所用的質點可能代表一個星球或數個星球甚至是一個星系；而星球的個別性質、成分都被忽略。當我們知道系統內質點的初始條件 ---- 位置和速度，有時包括質量 ---- 就可以利用牛頓運動定律，將每個質點隨時間變化的情形計算出來。

我們用的主要運算程式為樹枝狀碼（TREECODE），此方法源自於N質點法（N-body method），用以運算星系各質點間的作用力，介紹如下：

N 質點法 （N-body method）

我們在計算質點間的作用力時，設系統內有 N 個質點，每一質點所受到的作用力就是來自其他（N-1）個質點，而每個質點質量均同，故每個質點所受力總和為 N（N-1）/2，再用牛頓力學運算即可知下一點的位置，事實上整個系統每隔一時間間隔就需對 N 個牛頓運動方程式做積分，使每個運動方程式必須做N（N-1）/2 次的作用力疊加（見圖1.1），因此就需花費電腦很大的運算時間，即使是超級電腦也只能計算數千個質點，而模擬星系用數千個質點是不夠的。

樹枝狀碼 （TREECODE）

近年來天文學家發展出另一套方法樹枝狀碼，以減少計算質點所受作用力的次數。它不需要將每個質點所施的重力全部加起來，對於遠方的一群質點，當作一個大質點，質量為這群質點的總和，位置則是這群質點的質心，而對於附近的質點則必須一個一個計算。方法為將分佈在一空間的質點群分割，直到每一格中只有一個質點。算某一質點時，任一格對此質點所張的角度如果大於運算角度就需要再分割，直至其一格可包含於運算角度內；若許多格均包含於運算角度內則當作一大質點，質量為各質點質量和，位置即質心位置；這就是樹枝狀碼的運算方式，它將計算作用力的次數由原先的N(N-1)/2 次加快到 N logN 次，使電腦可以處理一個具有上萬個質點的系統。

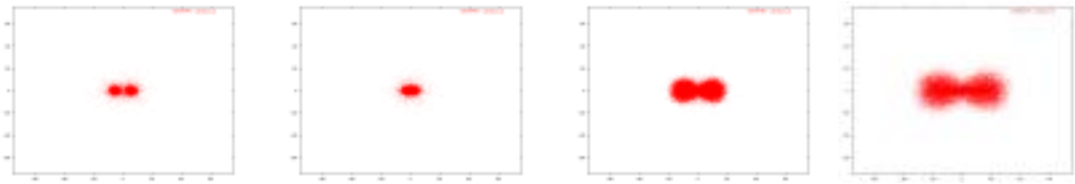
我們用Joshnes E. Barnes提供在網路上的程式來產生兩個相同的星團。同時我們運算各星團的瀰散速度，由此速率可知各系統的溫度，我們要討論此速度與相對速度對兩星系作用的影響。

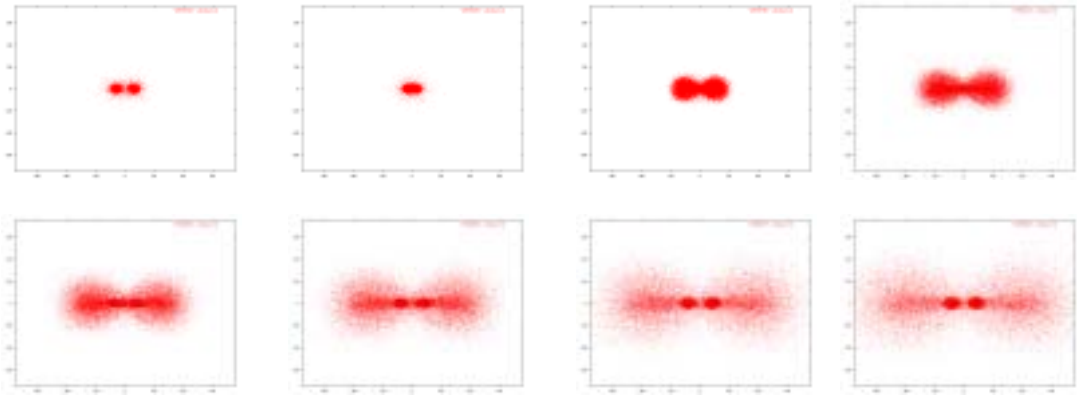
在 P.M.S.Namboodiri 的論文中，他用質點數為 1024 個的球狀星系兩個正面碰撞，得到的結果是相對速度小於四點一倍的內部分布速度（V<4.1 σ）就會合併，我們設 4.1 為 k 值；在< 實驗一> 中：我們將質點數增為 50000 個的兩個相同球狀星系，以此較接近實際星系的模型，以運算其 k 值，與 P.M.S. Namboodiri 的（V<4.1 σ）比較；<實驗二>將兩相同為 1024 個質點的球狀星系，以不同的角度碰撞，討論其碰撞形狀與 k 值。

實驗結果

<實驗一>

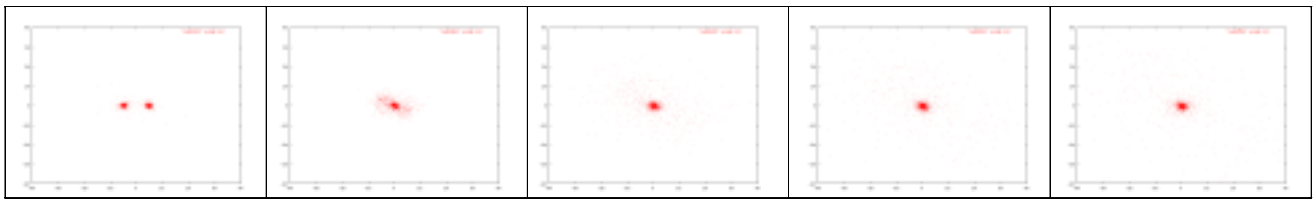
以兩個有 50000 個質點的相同球狀星系，做正面碰撞，相對速度 V<1.14 單位速度時會合併。此星系的內部分布速度 σ = 0.2788 單位速度，所以可得 V<4.09 σ 時會合併。約與 P.M.S. Namboodiri 的 1024 個質點所得的結果相同（V<4.1 σ），因此實驗二以 1024 個質點為模型，以方便運算。



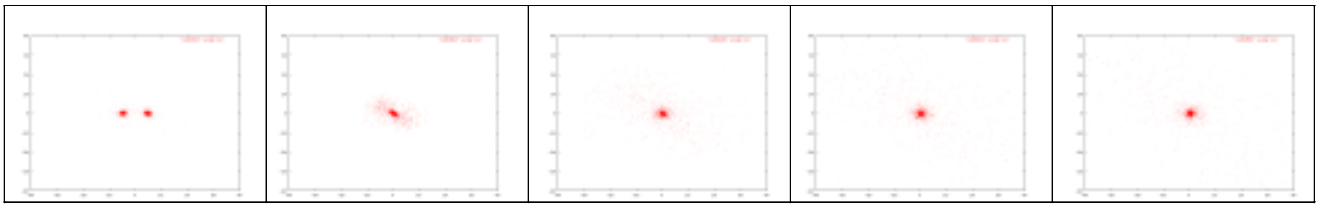


<實驗二>

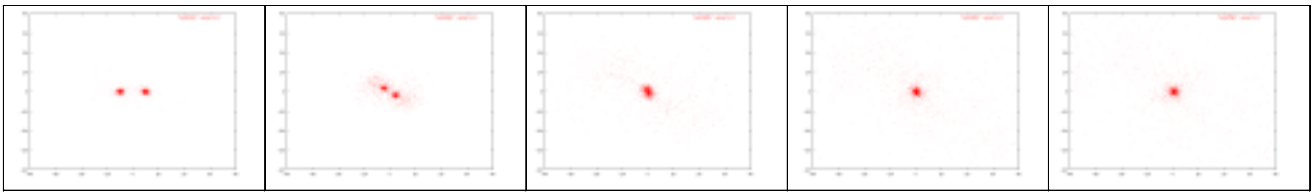
以兩個有 1024 個質點的相同球狀星系，做有角度的碰撞，此星系的內部分布速度 σ = 0.2776 單位速度，我們以兩星系速度的方向取其夾角（a），如下圖。



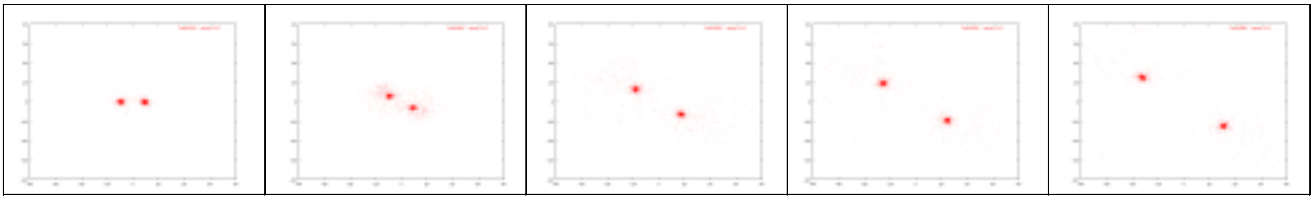
碰撞結果：合併，外圍發散。
Sin(a)=0.1 a=5.74 Vx=0.6



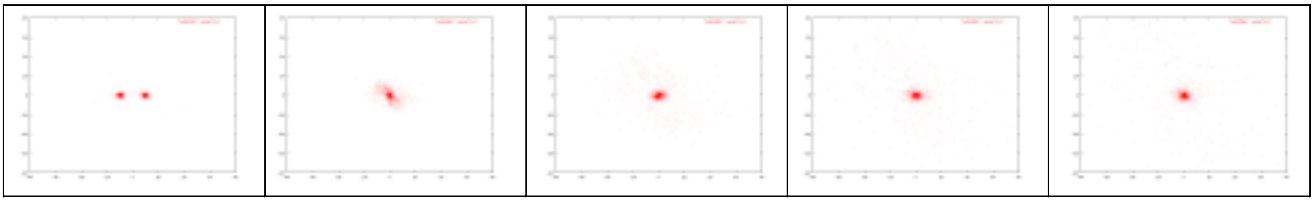
碰撞結果：合併，外圍發散，穿過後受引力拉回而再度碰撞後合併。
Sin(a)=0.1 a=5.74 Vx=0.8



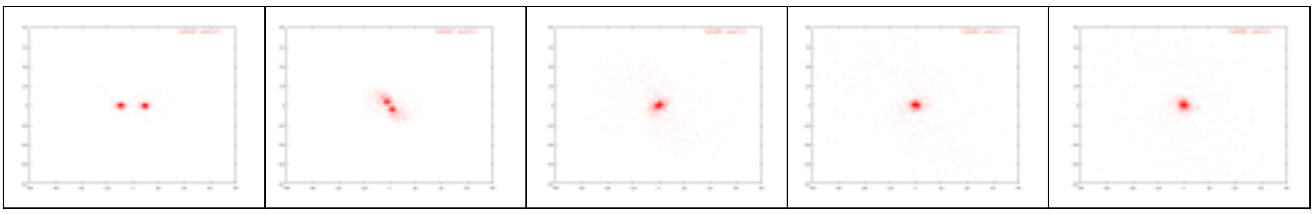
碰撞結果：合併，外圍發散，碰撞時產生互繞之後合併。
Sin(a)=0.1 a=5.74 Vx=1.0



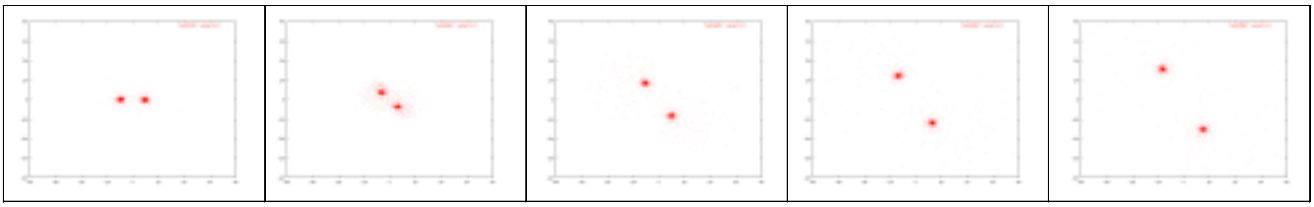
碰撞結果：擦過分離，外圍成扇行發散各自分離。
Sin(a)=0.1 a=5.74 Vx=1.2



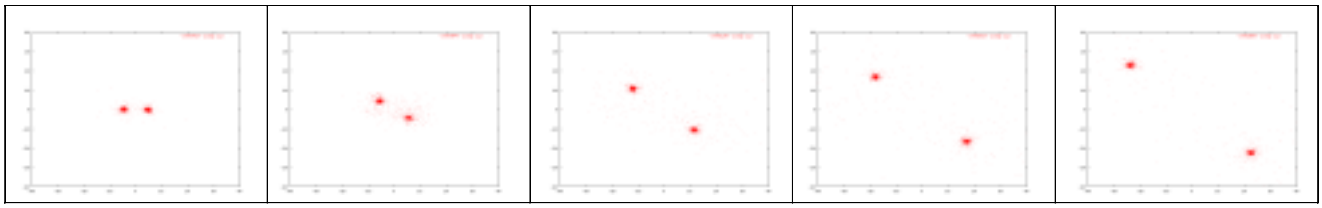
碰撞結果：合併，外圍發散，碰撞以後纏繞，外層物質發散。
Sin(a)=0.2 a=11.537 Vx=0.6



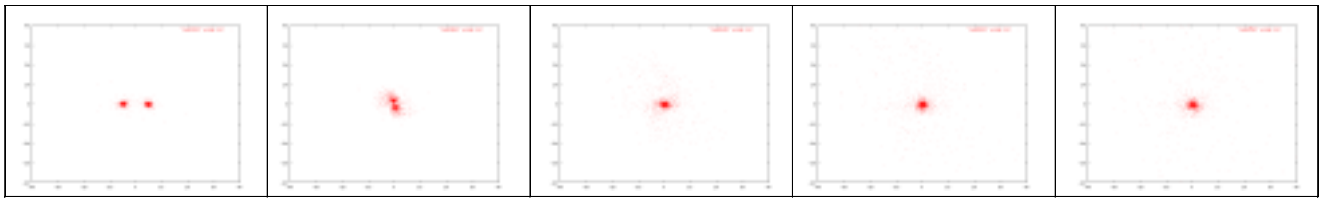
碰撞結果：合併，外圍發散，擦過分離再拉回合併。
Sin(a)=0.2 a=11.537 Vx=0.8



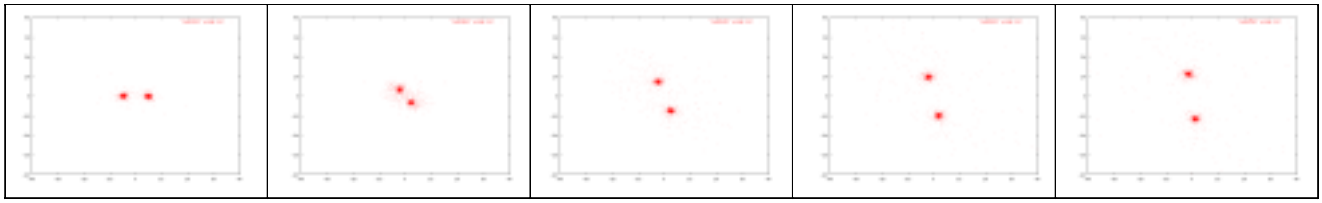
碰撞結果：擦過分離。
Sin(a)=0.2 a=11.537 Vx=1.0



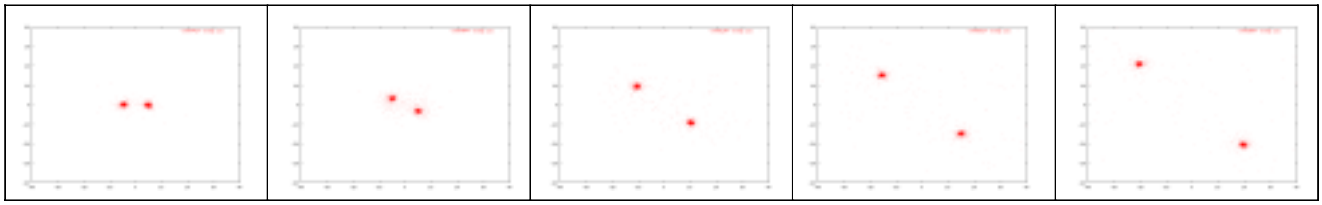
碰撞結果：擦過分離。
Sin(a)=0.2 a=11.537 Vx=1.2



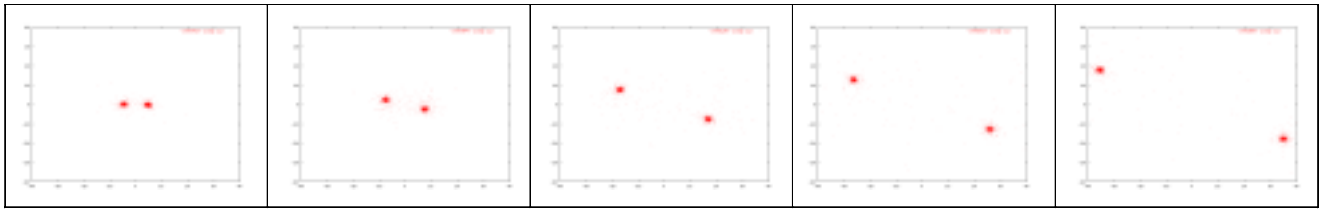
碰撞結果：合併，外圍發散，擦過後互繞，拉回纏繞合併。
Sin(a)=0.3 a=17.4576 Vx=0.6



碰撞結果：擦過分離後速度漸小達到平衡狀態。
Sin(a)=0.3 a=17.4576 Vx=0.8



碰撞結果：擦過分離。
Sin(a)=0.3 a=17.4576 Vx=1.0



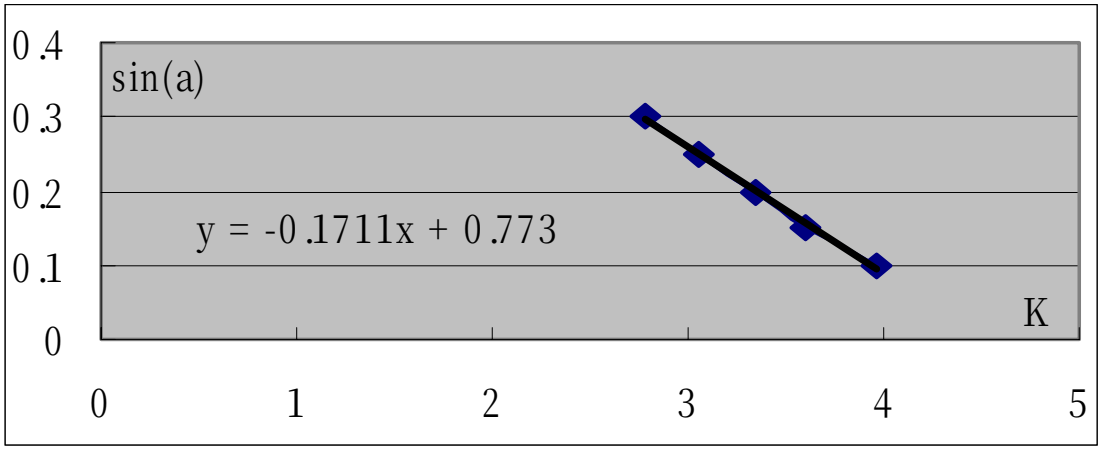
碰撞結果：擦過分離。
Sin(a)=0.3 a=17.4576 Vx=1.2

將實驗結果整理後，如下表：

<實驗二> 的結果

Sin(a)	角度(a)	k	臨界相對速度 V_X
0.1	5.74	3.96	1.1
0.15	8.63	3.6	1.0
0.2	11.54	3.42	0.93
0.25	14.48	3.06	0.85
0.3	17.46	2.77	0.77

接著以 sin(a)為縱軸， k 值為橫軸，得到其關係式。



研究討論

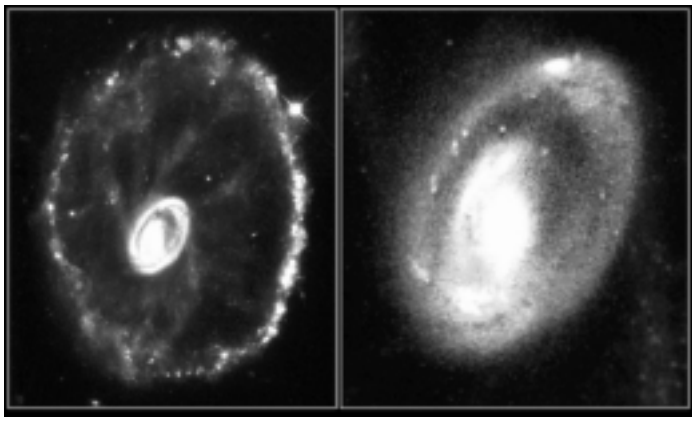
1. 由<實驗一>五萬個質點所算出的值約為 V<4.1 σ，與 1024 個質點所得的值相同，所以質點數多寡與碰撞結果關係不大。

2. 當初始速度為有角度的碰撞時，所得 k 值會隨著角度增大而減小，可知當角度愈大時愈不容易產生合併的情形。 K 值與角度的正弦值成線性關係。

3. 就實驗中碰撞後軌道偏差的程度，我們將碰撞結果分成合併與分離兩種情形：

(1) **分散**：因碰撞時引力的影響，而造成軌道的偏差，使星系轉向，各自運行。速度愈小引力影響的程度愈顯著，使得速度小的星系軌道偏離愈大。

(2) **合併**：在速度較小（V<k σ）中，兩星系無法脫離彼此的引力影響，使兩星系原先的軌道完全被破壞；就算速度夠大可以使兩星系分離一小段距離，而產生互繞的結果，終究逃不出引力範圍而合併。



由哈伯望遠鏡所攝得的車輪星系影像，車輪星系是由於星系正面碰撞所產生。

4.碰撞後的形狀與碰撞過程有關；碰撞時星系會呈輻射狀發散，或呈螺旋狀發散。在有角度的情形中，會產生三種情形：

(1) 在速度小、角度小的情況下，受引力的影響，角度的差異並不顯著而產生類似正面碰撞的輻射狀發散。

(2) 有角度碰撞的過程中，星系擦身而過又受引力影響而轉向，則會產生螺旋形發散。

(3) 有角度碰撞的過程中，星系擦身而過又受引力影響，於是被拉回，產生第二次碰撞，因距離較近引力影響較大，造成近似正面碰撞的輻射狀發散，最後的結果是外層有不顯著的螺旋狀發散，內層為輻射狀發散。

結論

1.在我們的實驗中，質點數的多寡並不影響實驗結果。因此在此類模擬時，可用較少的質點來討論球狀星系的作用，以減少運算的時間。

2.我們改變角度求其k值，得到k值與角度正弦值的關係式：$\sin(a) = -0.1711k + 0.773$ 由此式可推斷球狀星系碰撞的情況。

3.角度愈小或速度愈小，引力的影響較顯著，使星系碰撞後軌道的改變更大。

4.由星系的形狀可以推論它曾經與其他星系發生的作用。

未來展望

在我們做碰撞模擬的實驗中發現星系碰撞時會發生質量損失的情形〈兩星系互相穿過時會帶走對方的部分恆星〉，因此我們可以用電腦模擬找出損失質量與碰撞初始速度、角度的關係，再與實際觀測資料中星系的不同成分比例相較，推測此星系的發展史。

參考資料

1.曾耀寰，1995.5，"電腦螢幕上的宇宙(下)"，P.368~376，科學月刊第26卷第5期

2.曾耀寰，1998.1，"大麥哲倫王的新衣服"，P.25~33，科學月刊第29卷第1期

3.馬駰＆李秉乾原著，1995.11，恆星世界，牛頓出版，新世紀物理研習叢書3

4.P.M.S.Namboodiri, 1994, "Head-on Collision of Spherical Galaxies", Astronomical Society of India/Provided by the NASA Astrophysics Data System

5.Francois Schweizer, 1986, "Colliding and Merging Galaxies", SCIENCE, VOL.231. P. 227

6.Joshua E. Barnes & Lars E. Hernquist, 1992, "Dynamics of Interacting Galaxies", P.705~743

7.Joshua E. Barnes & Lars E. Hernquist, 1993, "Computer Models of Colliding Galaxies", PHYSICS TODAY, MARCH 1993. P.54

8.Konrad Kuijken & John Dubinski, 1995. MNRAS.277.1341K

9.M.D.Weinberg, 1985.MNRAS.213.451W

作者：現就讀於北一女中