

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	160028
參展科別	物理與天文學
作品名稱	模擬黑洞潮汐破壞事件之演化和分析其逃逸比例與吸積率之探討

就讀學校	臺中市立臺中第一高級中學
指導教師	楊湘怡 鄒東羽
作者姓名	利承祐 王承永

關鍵詞	<u>潮汐破壞事件 、 逃逸比例 、 吸積率</u>
-----	----------------------------

作者簡介



我是利承祐(左)，目前就讀臺中一中高二。從國中開始，我便對物理感興趣，上高中加入天文社後，更是被天文物理所吸引，並且在天文社擔任教學。

我是王承永(右)，平時喜歡思考棋類問題，透過網狀分析尋找適合的格式，透過條列式特徵與基本條件來挑選出適合應對當下局面的戰術，這種思維模式也被我運用在做科學研究及分析。

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：

科別：物理與天文學科

作品名稱：模擬黑洞潮汐破壞事件之演化和分析其逃逸
比例與吸積率之探討

關鍵詞：潮汐破壞事件、逃逸比例、吸積率

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

摘要

在超大質量黑洞周圍，偶爾能觀測到潮汐破壞事件的發生，而這也是一個能夠探測黑洞的手段。潮汐破壞事件是一種特殊的現象，當一個天體進入到所謂的「洛希極限」半徑範圍內時，因為受到的潮汐力超越了自身的重力而遭到撕裂。當這個事件發生時，會因為黑洞在吸積的過程中產生明顯的亮度變化，因此可以透過一系列的亮度變化觀測潮汐破壞事件，並可以推算黑洞的各項參數，因此潮汐破壞事件在天文學的發展上有其重要性。

因此，我們想要嘗試模擬潮汐破壞事件的演化過程。我們學習 **Linux** 語言以及如何使用 **Mcluster** 和 **PeTar** 等模擬軟體，並透過 **Python** 分析模擬結果，然後與理論預測值進行比較，以了解我們有那些地方需要修正。

Abstract

Around supermassive black holes, tidal disruption events (TDEs) can occasionally be observed. These events offer a method for probing black holes. A TDE is a unique phenomenon that occurs when a celestial body enters the region within the so-called "Roche limit" radius. At this point, the tidal forces exerted by the black hole exceed the body's own gravitational forces, causing it to be torn apart. During this process, the black hole's accretion causes significant brightness variations, which can be observed to track the TDE and estimate various parameters of the black hole. Consequently, TDEs hold substantial importance in the development of astronomy.

We aim to simulate the evolution of TDEs. To this end, we are learning to use Linux, as well as simulation software like Mcluster and PeTar. Through Python, we analyze the simulation results and compare them with theoretical predictions to identify areas that may require adjustments.

壹、 前言

一、研究動機

一開始，我們只是對天文有興趣的學生，因此加入了天文社；我們也喜歡觀星也喜愛學習天文新知，來增加自己對天文的認識。在一次瀏覽台北市天文館的天文新聞時，偶然看到一篇關於潮汐破壞事件的文章，內容提到：「2023 年有研究小組利用超新星全天自動巡天（ASAS-SN）系統探測到在距離地球約 1.6 億光年的 NGC 3799 星系中有顆恆星亮度激增後迅速變暗。這是第一次用可見光觀察到黑洞，讓我們可以更進一步了解超大質量黑洞是如何生長和吸取周圍物質。」

黑洞本身已非常具有吸引力了，但從沒想過被黑洞吸入的恆星也會有令人意外的巨大變化，這著實激起了我們的好奇心，讓我們想探索更多有關黑洞潮汐破壞事件的更多資訊，並且嘗試模擬及分析黑洞的潮汐破壞事件。

二、研究目的

關於黑洞的潮汐破壞事件，我們查詢文獻後，我們認為可以往「逃逸比例」以及「吸積率」兩個方向去分析，因此我們訂立了以下兩個研究目的：

- (一)模擬潮汐破壞事件並探討被撕裂的星團的逃逸比例
- (二)模擬潮汐破壞事件並探討黑洞對被撕裂的星團的吸積率

三、文獻探討

關於黑洞的潮汐破壞事件，以下是它的形成原因與該現象的特徵：

(一) 概述

以下是關於潮汐破壞事件的概述：

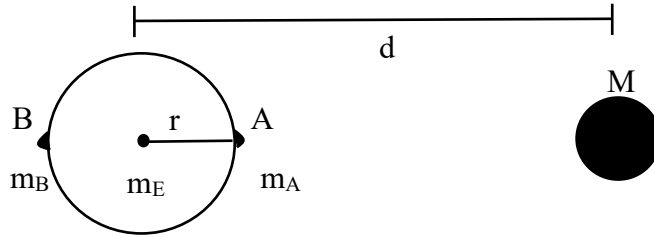
潮汐破壞事件（tidal disruption event，簡寫為 TDE）是一種在恆星靠近超大質量黑洞（SMBH）時產生的天文現象。當一顆恆星接近黑洞時會被黑洞的潮汐力撕裂。在這個過程發生之後，恆星的一部分質量會被黑洞吸至吸積盤中，而在物質落入吸積盤中的過程中，會產生短暫的電磁輻射耀斑。然而，有些恆星擁有高密度的核心，這使得其在接近超大質量黑洞並受到潮汐力相互作用後仍得以倖存，且不只一次繞該黑洞運行(如 AT2018fyk 事件)，這類事件則被稱為重複潮汐破壞事件。

(二) 形成原因

在一個雙星系統中，因為距離的不同，導致星體表面會產生相對的引力差進而產生潮汐力，而當潮汐力與重力達到平衡的位置便是洛希極限。

當一星體進到洛希極限內，便會被潮汐力所撕裂。以下是潮汐力與洛希極限的推導：

圖一：潮汐力推導過程示意圖（圖片來源：作者自行繪製）



$$F_A = \frac{GMm_A}{(d-r)^2} = m_A a_A$$

$$F_E = \frac{GMm_E}{d^2} = m_E a_E$$

$$\begin{aligned} a_{AE} &= \frac{GM}{(d-r)^2} - \frac{GM}{d^2} \\ &= GM \left(\frac{1}{d-r} + \frac{1}{d} \right) \left(\frac{1}{d-r} - \frac{1}{d} \right) \\ &= GM \left(\frac{2d-r}{d^2-dr} \right) \left(\frac{r}{d^2-dr} \right) \\ &= GM \frac{r(2d-r)}{(d^2-dr)^2} \end{aligned}$$

$$(\text{取 } d \gg r) \Rightarrow GM \frac{2dr}{d^4} = GM \frac{2r}{d^3}$$

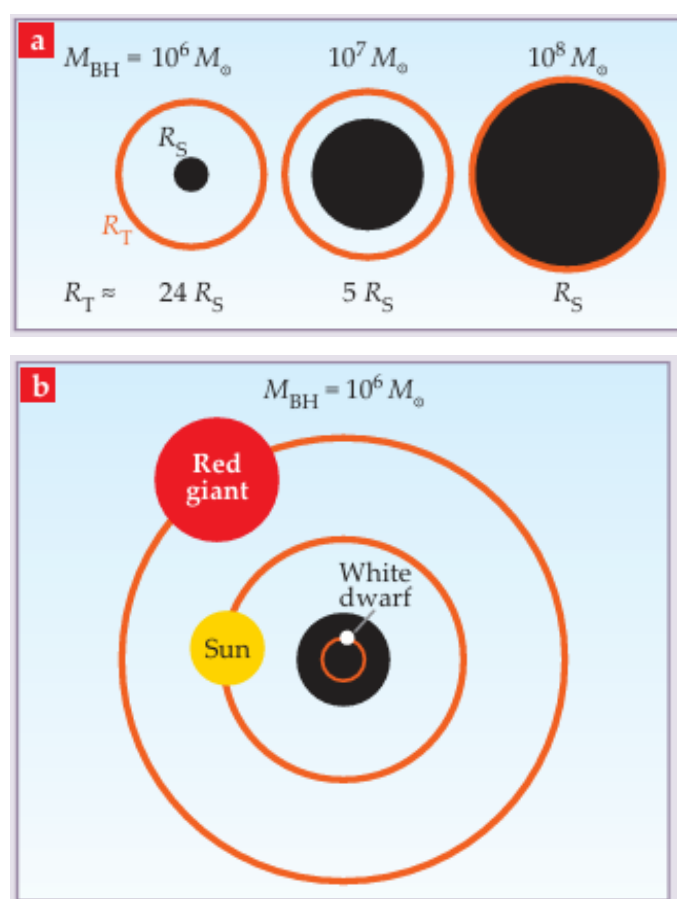
故潮汐力 $F_{\text{潮汐}} = 2GMm \frac{r}{d^3}$ ，與 M 、 r 成正比，與 d^3 成反比

而洛希極限則是：

$$2GMm \frac{r}{d^3} = \frac{GMm}{r^2} \rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{2M}{m}} \cdot r$$

而黑洞的洛希極限，與黑洞的質量的 $1/3$ 次方成正比，且與該恆星的半徑成正比，正如下圖所示：

圖二：洛希極限示意圖



(圖片來源：Suvi Gezari，2014)

圖二 a 中，橘色的圈為洛希極限 R_T ，黑色為史瓦西半徑 R_S 。當固定恆星質量時，洛希極限隨質量變大的趨勢較史瓦西半徑慢，與質量的 $1/3$ 次方成正比，而史瓦西半徑($r=2GM/c^2$ ，其中 c 為光速)則是與質量的 1 次方成正比。因此，必然存在某個非常大質量的黑洞，使得史瓦西半徑趕上甚至超越洛希極限，並且恆星在被撕裂之前就被黑洞吞食了。

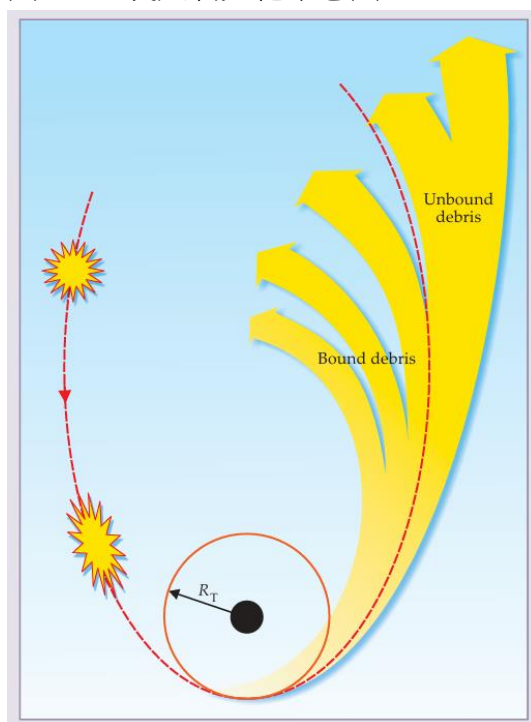
圖二 b 中，當固定黑洞質量時，洛希極限的大小隨恆星大小成長，且成正比。

(三) 相關現象

1. 義大利麵化

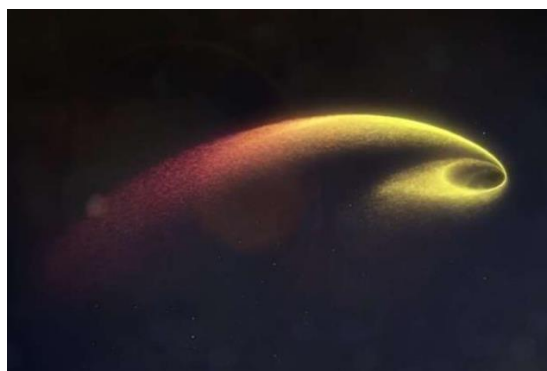
「義大利麵化」一詞可追溯至史蒂芬·霍金在 1988 年於其著作《A Brief History of Time: from the Big Bang to Black Holes》中所提及，但其實「義大利麵化」一詞在更早以前就已被提出。在黑洞潮汐破壞事件中，恆星被撕碎的同時，其整體仍然在繞著黑洞運行，而產生如義大利麵般拉長的現象，此現象稱為「義大利麵化」。(維基百科，2022)

圖三 a：義大利麵化示意圖



(圖片來源：Suvi Gezari，2014)

圖三 b：潮汐破壞事件模擬影像



(圖片來源：臺北市立天文科學教育館天文新知 2024 年 03 月 07 日)

圖三 a 表示，在恆星經過洛希極限後被撕裂，有一部分會受引力束縛在黑洞的附近，而另一部分則是逃離黑洞，因而形成義大利麵化的現象。圖三 b 則是利用電腦模擬潮汐破壞事件的影像。

2. 電磁輻射耀斑

恆星在受到潮汐破壞事件後，部分恆星碎片會回落到黑洞的吸積盤，這個過程使重力位能轉換成動能以及部分以電磁波的形式輻射出來，看起來如耀斑一樣，因此稱為電磁輻射耀斑。因為有電磁輻射耀斑，使我們得以觀測潮汐破壞事件。

潮汐破壞事件的電磁輻射具有一些特性與數學模型關係，故而我們可以推測黑洞的質量以及該潮汐破壞事件的環境等。

根據 Suvi Gezari (2014)的指出，利用電腦數值模擬的結果，恆星碎片落入超大質量黑洞吸積盤的早期演化過程，與黑洞質量以及被破壞恆星的質量和內部結構具有極大的關聯。尤其，從破壞時間（ t_D ）到潮汐破壞事件耀斑峰值亮度（ t_P ）的時間間隔可以用來推估超大質量黑洞的質量。

在假設被破壞的恆星具有均勻密度的情況下，可以得到以下數學式：

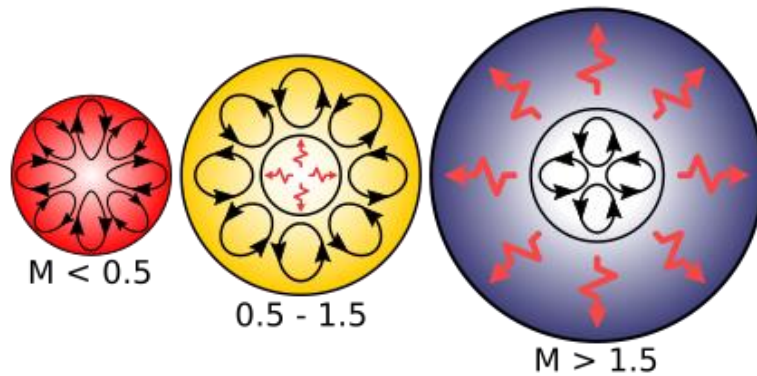
$$\Delta t = t_P - t_D \approx 41 \text{ 天} \times \left(\frac{R_*}{R_\odot}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{M_{BH}}{10^6 M_\odot}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_\odot}{M_*}\right)$$

(其中 R_* 、 M_* 分別為恆星的半徑與質量， $R_\odot$ 、 $M_\odot$ 分別為太陽的半徑與質量， M_{BH} 為黑洞的質量)

但實際上，潮汐破壞事件的光變曲線中，我們可以精確地確定 t_P ，但無法精確地限制(原文中使用 **constrain** 一詞)起始時間 t_D 。然而，有對不同內部結構的恆星的數值模擬的範本，可用於擬合光變曲線以確定 t_D 。

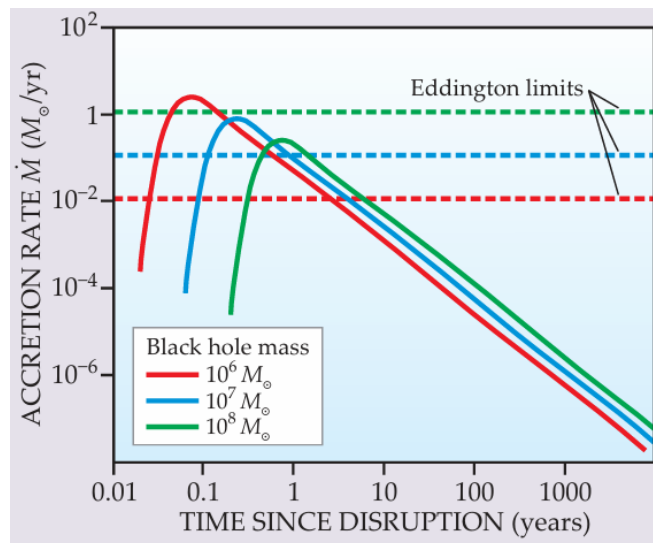
然而，即使對 Δt 已經有很好的解決辦法，但該數學式中仍有未知的恆星質量和半徑也給黑洞的質量留下了一個很大的不確定性。此外，這顆恆星的密度分佈我們也不知道。在它們生命中位於主序帶的階段，恆星在其核心燃燒氫，但是主序星的內部結構差異很大，這取決於各層中熱傳播的途徑(如圖四)，而熱傳播的途徑又取決於質量，因此這種內部結構的多樣性在從 Δt 推測黑洞質量時產生了另一個嚴重的不確定性。但事實證明，主序星的質量和半徑之間的相關性在很大程度上抵消了與質量也相關的內部結構對 Δt 的影響。因此，即使我們不知道被破壞的主序星的質量，對 Δt 的觀測也可以限制黑洞的質量。另外，儘管主序星在星系中是最常見的，但已經演化到後期的恆星(如：紅巨星、白矮星)仍然會造成 TDE，不過別擔心，鑒於它們具有極端的半徑，因此他們在光變曲線也會有極端值。

圖四：不同質量恆星的內部結構差異



(圖片來源：維基百科，2013)

圖五：不同質量黑洞對類太陽恆星的吸積速率模型計算圖



(圖片來源：Suvi Gezari，2014)

但是還有一個問題，大多數恆星的密度都不是均勻的。相對於上述數學式的預測，因為靠近恆星表面的密度較低，所以在 TDE 演化過程早期的碎片較少，落入吸積盤的時間較短，因而減緩上升到亮度峰值的速度。圖五顯示了類太陽恆星的碎片落入黑洞吸積盤上的速率的模型計算，縱軸為吸積速率，橫軸為自 t_0 以來的時間函數。從圖中我們可以發現，隨著黑洞質量的增加，達到峰值吸積的時間增加，但峰值吸積速率降低。且對於較輕的黑洞，峰值吸積率超過了愛丁頓極限，超過該極限，吸積可能會產生噴流(包含流出的物質和電磁波輻射)。另外，TDE 耀斑的光度與回落的速率成正比。曲線顯示了上升時間 Δt 取決於 SMBH 的質量。因此，原則上， Δt 可以作為黑洞質量指標。在 TDE 演化後期，由於受到引力束縛的克卜勒軌道範圍影響，吸

積速率以獨特的—— $t^{-5/3}$ 幂律衰減(圖四的兩軸皆已對兩者取 log，故成斜率-5/3 的斜直線)。

在圖五還顯示了不同質量的 SMBH 的愛丁頓極限吸積率(虛線部分)，該計算結果顯示了吸積物質約以 10% 的典型效率發射輻射，當超過愛丁頓極限時，向外的輻射壓力會超過向內的引力。若恆星碎片各向同性地向落向黑洞，並且整個系統處於流體動力學的平衡狀態，超過愛丁頓極限的物質會被向外吹走，而不是被吸積。然而，模型計算在 t_p 附近確實顯示了短暫超愛丁頓後回降。在這些情況下，吸積率峰值後的迅速下降可防止膨脹的吸積盤吹散大部分碎片。這樣的回降可能會產生特別的光變曲線的光譜演變，並且探測到這些變化將能強而有力地證實潮汐破壞事件的理論模型。

3. 利用黑洞吸積過程光變曲線的差異來探測黑洞的自旋

Suvi Gezari 在其 2014 的研究中提到，從 TDE 的觀測中我們還可以推測該黑洞的自旋。正如我們在圖二中看到的，黑洞在質量等於 $10^8 M_\odot$ 時其史瓦西半徑等於其與類太陽恆星間的洛希極限，這是假設黑洞沒有自旋的情況下得出的結果。而無自旋黑洞的事件視界位於史瓦西半徑，且事件視界內發生的任何事情都不能被外人看到。

但事件視界會隨著黑洞角動量 J 的增加而縮小，對於 $J = GM_{BH}^2/c$ (廣義相對論允許的最大值) 的黑洞，事件視界已縮小到一半史瓦西半徑($R_s/2$)。對於最大旋轉的 SMBH，在黑洞質量達到 $7 \times 10^8 M_\odot$ 之前，類太陽恆星的事件視界不會達到洛希極限。因此，如果我們看到一顆類太陽恆星被一個比 $10^8 M_\odot$ 更大的黑洞撕裂，我們就知道該 SMBH 一定在自旋。而 TDE 中 SMBH 自旋的另一個後果可能是高能物質和輻射的瞬態噴流，沿著由恆星殘骸所形成的短暫吸積盤的軸線噴射而出。

另外，在所有的活躍星系核 (AGN) 中，約有 10% 的 AGN 被觀察到來自持續且強大的噴流，伴隨的穩態無線電同步輻射，這些星系中心的 SMBH 以來自大型吸積盤的氣體為食，吸積過程中氣體受到粘性加熱而產生 X 射線的同步輻射。據推測，AGN 噴流是由旋轉的 SMBH 從纏繞在吸積盤周圍的磁場中獲得旋轉動能以提供動力。同樣地，假設由被吸積的恆星碎片所形成的新吸積盤，也具有足夠強的磁場，恆星被旋轉中的 SMBH 撕裂時，TDE 可能會發射一個瞬態噴流。不過，到目前為止，理論家似乎尚未詳細研究出 TDE 噴流的形成機制；但無論如何，我們仍然可以透過來自 TDE 的瞬態噴流向外傳播時的交互作用，來探測 SMBH 未受干擾前的環境。

貳、 研究方法與過程

一、 研究設備與器材

在看到前人做過的模擬後，我們也想嘗試，因此我們透過指導教授幫我們申請 CICA 帳號連結至清大的天文模擬實驗室的超級電腦跑程式模擬。以下是我們使用到的工具：

1. MobaXterm_Personal_24.2

MobaXterm 是一個終端連接軟體，是我們用來連接清大的天文模擬實驗室的超級電腦的工具，是而我們使用 Linux 語言去下指令給它，且以下的程式皆是在 MobaXterm 中使用。

2. Mcluster

Mcluster 是一款用於生成一個星團的程式，我們透過它來為我們生成一個能夠給我們跑模擬的星團。

3. PeTar

PeTar 是一款 N-body simulation code 用於天文物理的多體動力學模擬軟體)，我們使用它為我們跑模擬分析。

4. Python

我們在兩個階段中使用自己撰寫的 Python 程式，第一是用來將 Mcluster 產生的星團丟進 PeTar 的模擬環境，並新增一個超大質量黑洞給 PeTar 做為初始條件，第二階段是在模擬完後透過 Python 整理並分析數據。

二、研究過程

因為我們對於 Linux 語言以及 PeTar 和 Mcluster 等程式皆是第一次接觸，並且對於 Python 也不是很熟悉，因此我們第一步就是先學習 Linux 語言。接著，第二步要在 MobaXterm 的環境中下載 PeTar 和 Mcluster 並練習使用之。然後，我們寫 Python 分析 PeTar 模擬出來的結果。最後，在了解模擬及分析的 SOP 之後，我們便可以自己改變參數模擬之。

但是 PeTar 只能模擬重力作用下的多體粒子模擬，並不具備模擬單一顆恆星所需的核物理等，所以我們在模擬過程中我們是將恆星用一個星團近似以模擬。在初始參數的設定方面，我們使用的星團總質量為 3000 倍太陽質量，黑洞質量為 10^5 倍太陽質量，而速度我們則是以黑洞重力下的脫離速度作為標準，將初始速度設定為 x 倍脫離速度以描述之。而另一個參數則是初速度角度。

脫離速度的定義如下：

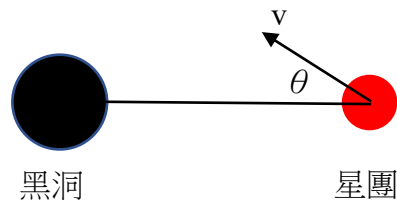
根據力學能的定義，當動能+位能=0 時，此時的速度為脫離速度，因此可得：

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

初速度角度(θ)定義如下：

圖六： θ 的定義 (圖片來源：作者自行繪製)

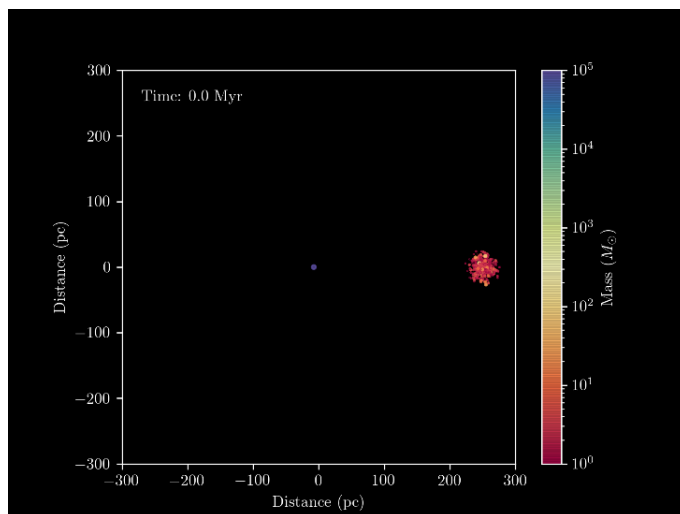


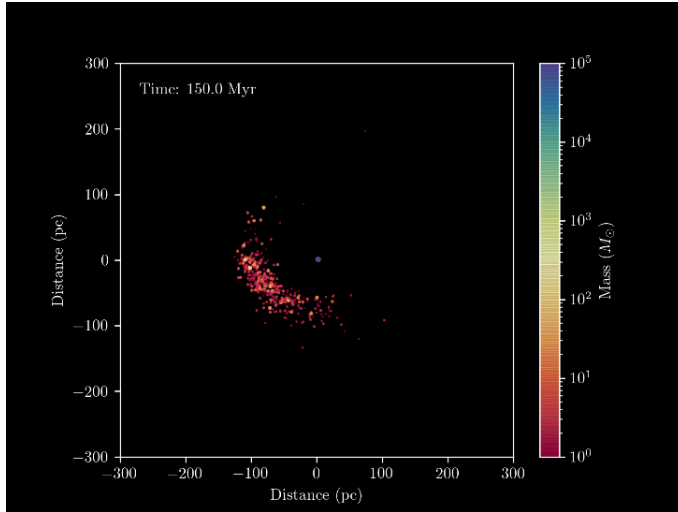
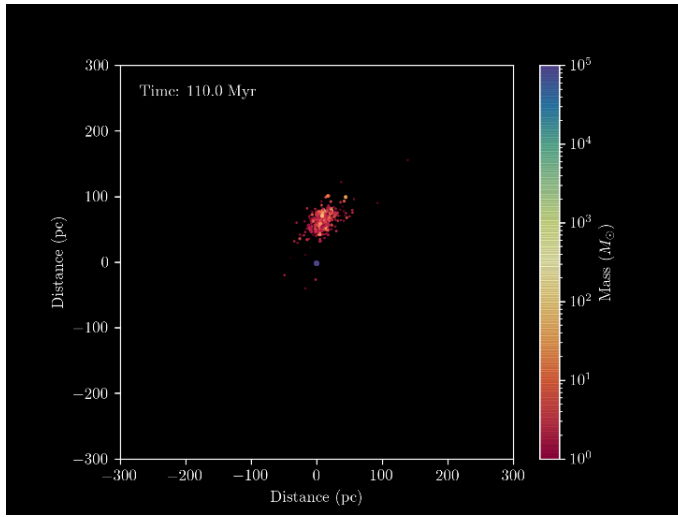
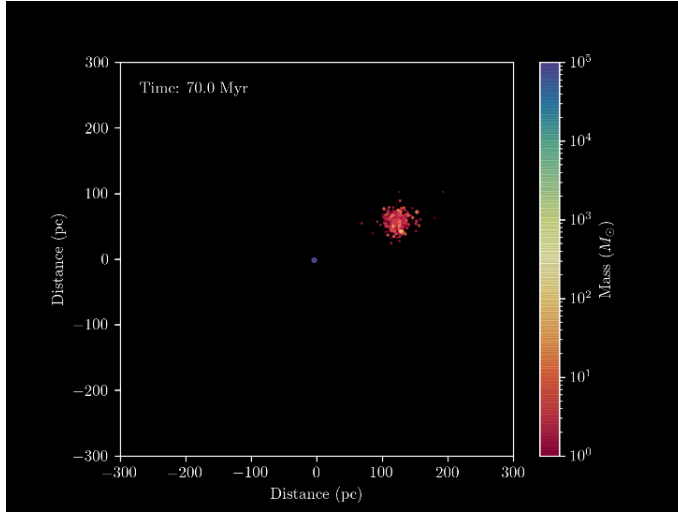
另外，根據文獻中的理論預測，在 TDE 事件中最主要探討的是逃逸比例與吸積率隨時間的演化，因此我們也會往這兩個方向進行分析。

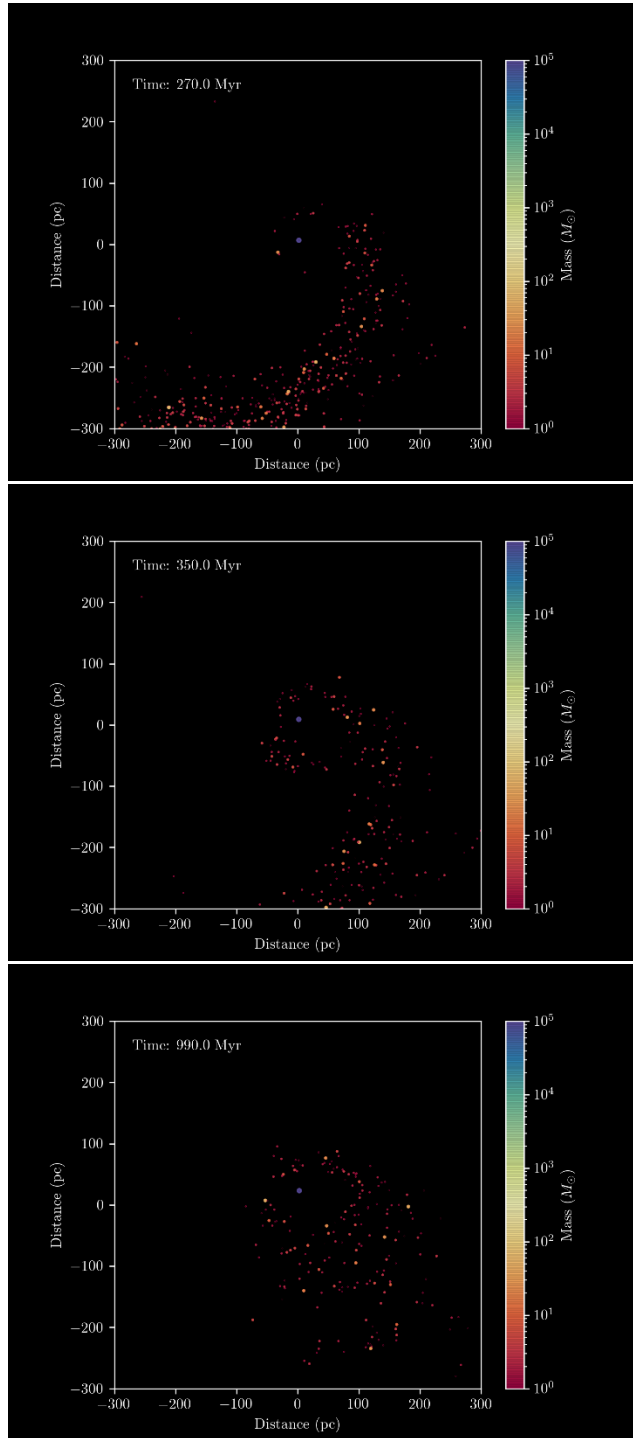
參、實驗結果與討論

首先，這是我們模擬潮汐破壞事件所產生的部分影像(以 0.9 倍脫離速度，初速度角度 30° 的模擬為例)：

圖七：各時間點的潮汐破壞事件模擬影像 (圖片來源：作者自行模擬生成)







接著，我們會對我們模擬後分析的逃逸比例與吸積率進行討論，而對於逃逸比例與吸積率我們的算法是：

$$\text{逃逸比例} = \frac{\text{逃逸粒子數}}{\text{所有粒子}}$$

$$\text{吸積率} = \frac{\text{該時間下的吸積質量}}{\text{該粒子是否能夠逃逸}}$$

而該粒子是否能夠逃逸，我們用力學能來討論：

$$E_k = \frac{1}{2} m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

$$U = -\frac{GMm}{d}$$

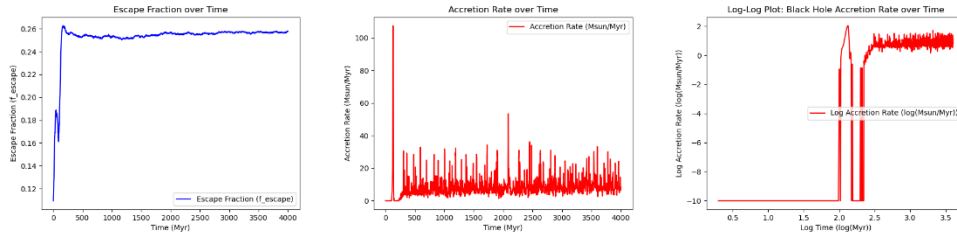
其中， m 為該粒子的質量， M 為黑洞質量， v_x 、 v_y 、 v_z 為粒子在各向量的速度， d 為粒子與黑洞間的距離。若一個粒子的 $E_k+U>0$ ，我們則視此粒子為逃逸的粒子。

至於吸積的質量，我們則是取 20pc 作為標準，當進入到 20pc 內的粒子，我們則視為被吸積的質量但是，在某些時間點，吸積質量是 0 的時候，為了取 $\log$ 的時候方便，我們視 0 為 10^{-10} 下去計算。

接下來是我們的分析結果，其中，我們會針對初速度的「不同速度大小」以及「相對於黑洞的角度」來分類進行討論。

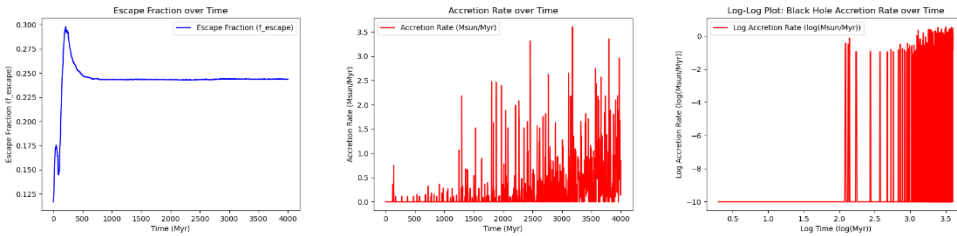
以下是我們做的各組模擬及分析：

圖八：0.7 倍脫離速度，初速度角度 30° (圖片來源：作者自行分析繪製)



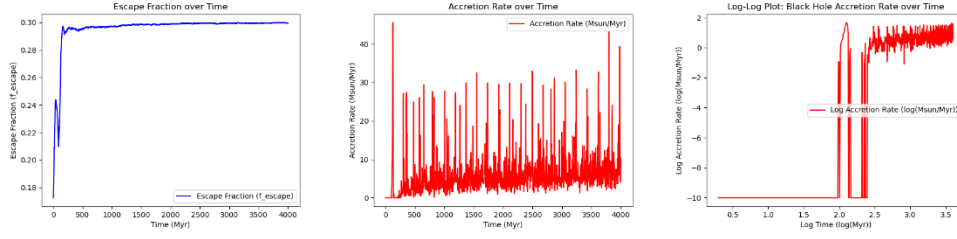
(左：逃逸比例，中：吸積率，右：有取 $\log$ 的吸積率)

圖九：0.7 倍脫離速度，初速度角度 45° (圖片來源：作者自行分析繪製)



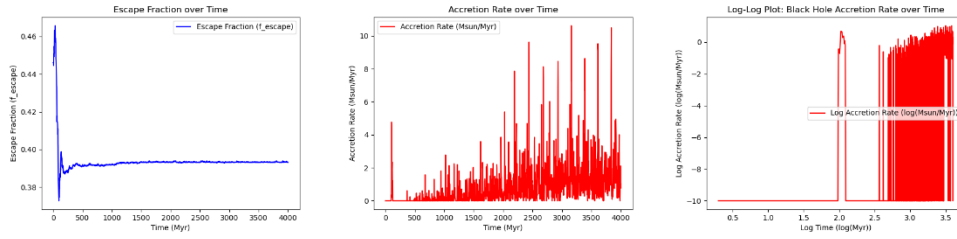
(左：逃逸比例，中：吸積率，右：有取 $\log$ 的吸積率)

圖十：0.75 倍脫離速度，初速度角度 30° (圖片來源：作者自行分析繪製)



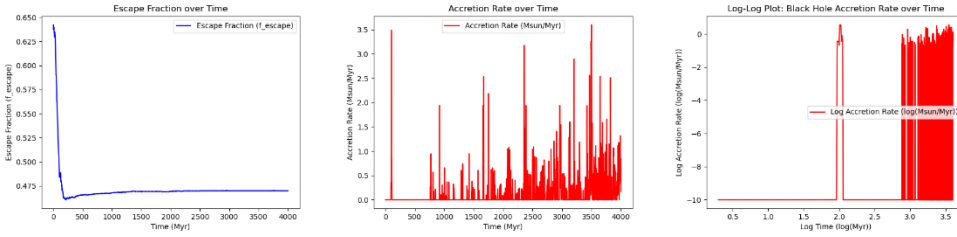
(左：逃逸比例，中：吸積率，右：有取 $\log$ 的吸積率)

圖十一：0.9 倍脫離速度，初速度角度 30° (圖片來源：作者自行分析繪製)



(左：逃逸比例，中：吸積率，右：有取 $\log$ 的吸積率)

圖十二：1.0 倍脫離速度，初速度角度 30° (圖片來源：作者自行分析繪製)

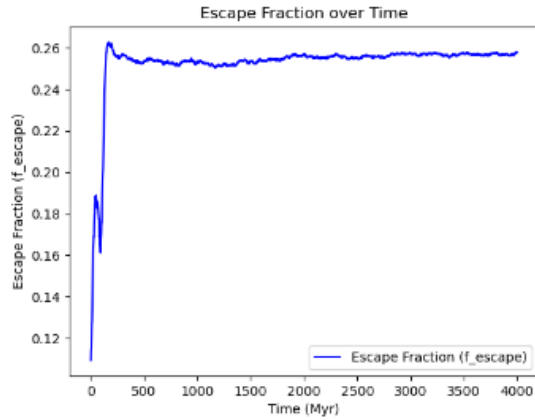


(左：逃逸比例，中：吸積率，右：有取 $\log$ 的吸積率)

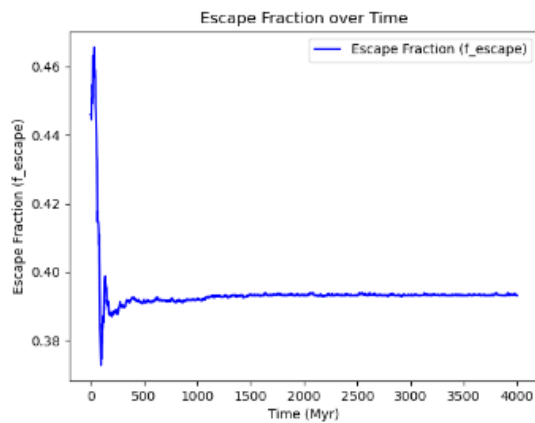
接著，我們要對數據進行比較，以下是我們比較的結果：

(一)、相同角度，不同速率，逃逸比例的差異

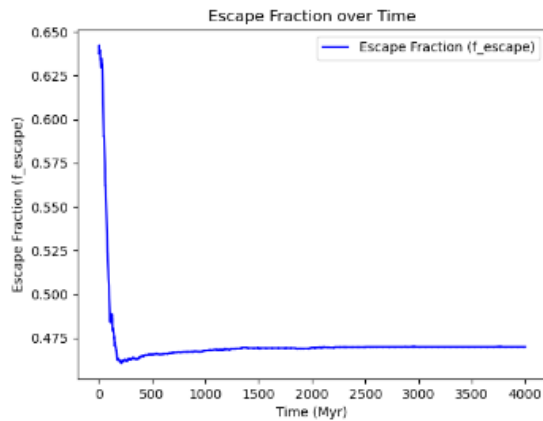
圖十三：初速度角度 30° ，0.7 倍脫離速度 (圖片來源：作者自行分析繪製)



圖十四：初速度角度 30° ，0.9 倍脫離速度 (圖片來源：作者自行分析繪製)



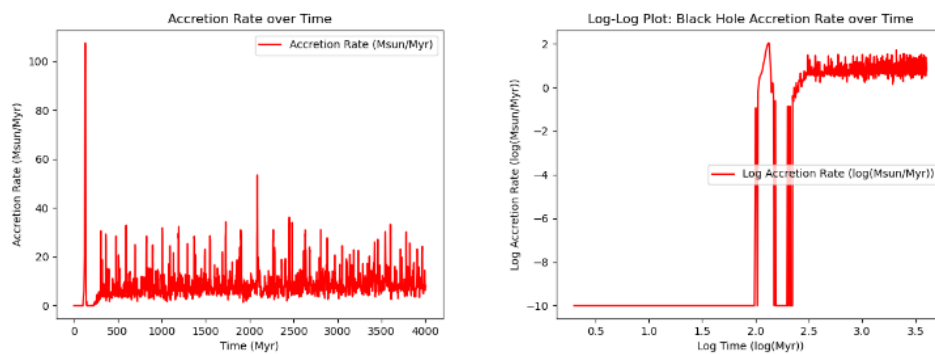
圖十五：初速度角度 30° ，1.0 倍脫離速度 (圖片來源：作者自行分析繪製)



根據這組比較，逃逸比例從 0.7 倍脫離速度的 0.26，到 1.0 倍脫離速度的 0.475，我們可以發現，速度越大，逃逸比例越大，並且在初速度大小=脫離速度時，逃逸比例接近 50%，與 Suvi Gezari 在其 2014 年於 *Physics Today* 發表的文章 *The tidal disruption of stars by supermassive black holes* 中所描述的數值相近。

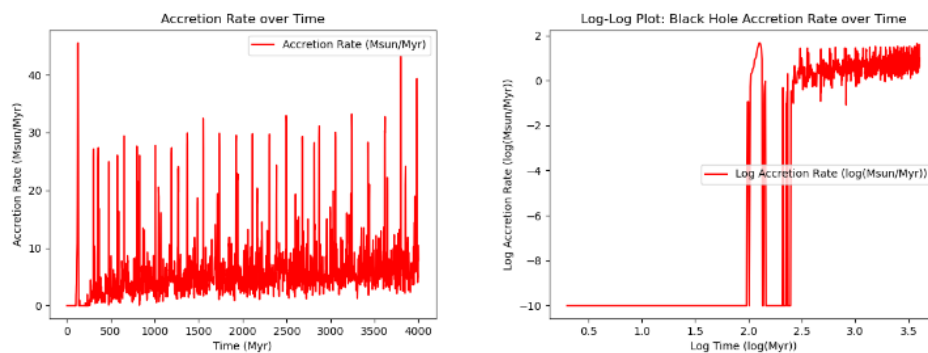
(二)、相同角度，不同速率，吸積率的差異

圖十六：初速度角度 30° ，0.7 倍脫離速度 (圖片來源：作者自行分析繪製)



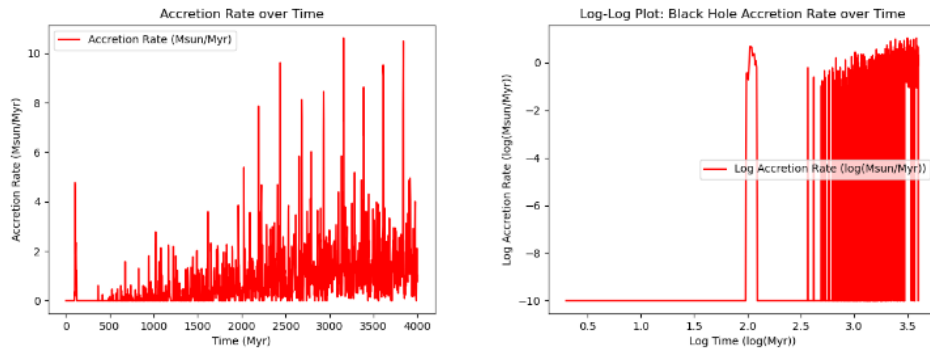
(左圖未取 log，右圖有取 log)

圖十七：初速度角度 30° ，0.75 倍脫離速度 (圖片來源：作者自行分析繪製)



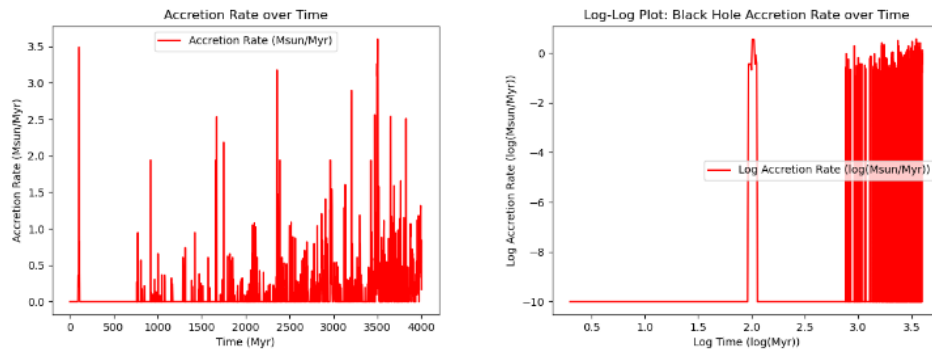
(左圖未取 log，右圖有取 log)

圖十八：初速度角度 30° ，0.9 倍脫離速度 (圖片來源：作者自行分析繪製)



(左圖未取 log，右圖有取 log)

圖十九：初速度角度 30° ，1.0 倍脫離速度 (圖片來源：作者自行分析繪製)

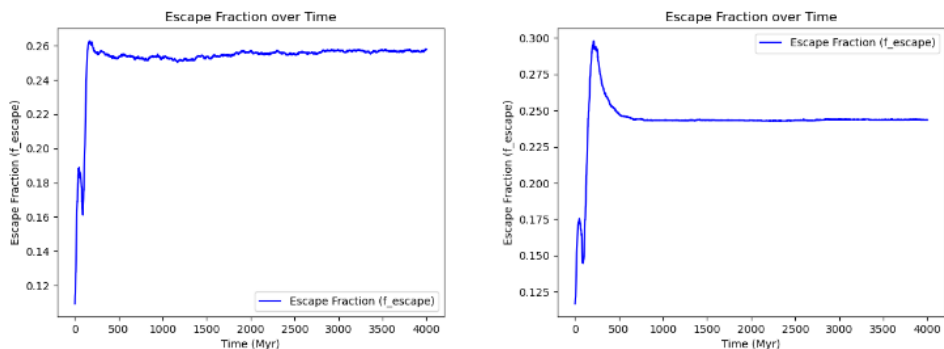


(左圖未取 log，右圖有取 log)

根據這組比較，吸積率從 0.7 倍脫離速度的 $10^0 \sim 10^2$ ，到 1.0 倍脫離速度的 $0 \sim 10^0$ ，我們可以發現，速度越大，吸積率會越小，因為會有更多的部分逃逸掉。另外，從取 log 後的圖來看，我們可以發現不同的趨勢，或者說，趨勢類似但在撕裂後有非常顯著的不同，在速度較大的情況下，吸積率有非常明顯的起伏。

(三)、相同速率，不同角度，逃逸比例的差異

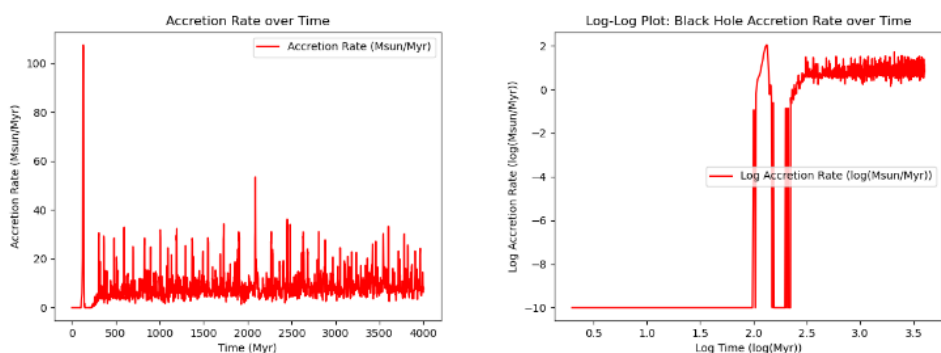
圖二十：左：0.7 脫離速度，初速度角度 30° ；右：0.7 脫離速度，初速度角度 45° (圖片來源：作者自行分析繪製)



根據這組比較， 30° 時在撕裂瞬間脫離比例是 0.26， 45° 時脫離比例是 0.3，我們可以發現，角度較大(45°)的，逃逸比例較大，因為相對之下，它的方向更朝外，因此更容易逃逸掉。

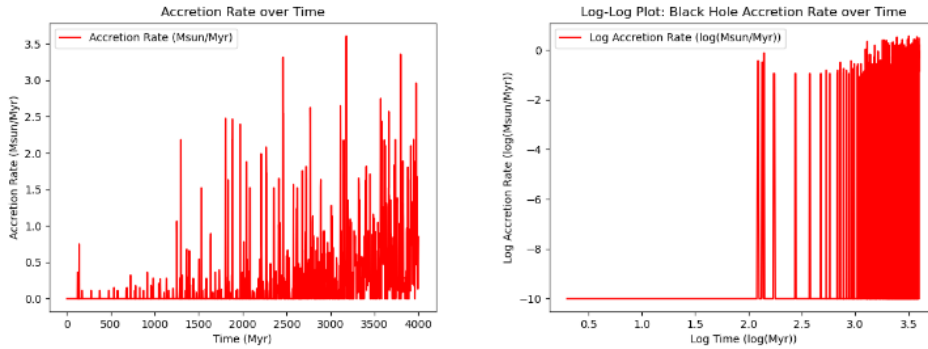
(四)、相同速率，不同角度，吸積率的差異

圖二十一：0.7 倍脫離速度，初速度角度 30° (圖片來源：作者自行分析繪製)



(左圖未取 log，右圖有取 log)

圖二十二：0.7 倍脫離速度，初速度角度 45° (圖片來源：作者自行分析繪製)



(左圖未取 log，右圖有取 log)

根據這組比較，我們可以發現，角度較大(45°)，吸積率會越小，也是因為會有更多的部分逃逸掉。另外，從取 log 後的圖來看，我們可以發現非常不同的趨勢，它有更多大起大落的趨勢。

肆、 結論與應用

在這些模擬及分析的數值當中，我們可以顯而易見地發現，隨著初始速度的增加，或者初速度角度的增加，星團會更易逃逸並且更不易吸積，並且不同參數下的數值在隨時間變化的趨勢上有一個明顯的差異與變化趨勢；在初速度大小=脫離速度時，逃逸比例約為 47.5%，Suvi Gezari 在其 2014 年於 *Physics Today* 發表的文章 *The tidal disruption of stars by supermassive black holes* 中所預測的 50% 相近。然而，我們無法做出如文獻中圖五吸積率以 $t^{-5/3}$ 冪律衰減的趨勢，我們推測有以下幾個原因：

1. 目前我們是使用星團來近似一顆恆星內部的質量，但目前的模擬中星團粒子的個數為 5114，而且每顆粒子的質量是不同的，因此在計算重力和吸積率時有可能會因此與理論預測不同，未來我們會嘗試增加粒子的個數，並且使用等質量的粒子來近似恆星。
2. 目前我們設定的星團質量為 3000 太陽質量，而黑洞質量為 10^5 太陽質量，因此或許除了黑洞的重力外，星團粒子也一定程度地影響了粒子的運動與吸積量，我們未來會減低星團的質量以更佳近似真實的 TDE 系統。
3. 我們在計算吸積率時，是考慮每個時間在黑洞附近的粒子質量，但那些應會被黑洞吞食的粒子在模擬中我們並沒有讓它們真的被吃掉，因此它們也會與其他粒子交互影響，也有可能在後期再被吸積，因此造成後期吸積率的不準確，因此，未來我們會朝這方向改善。

伍、 參考資料

1. Suvi Gezari . (2014).The tidal disruption of stars by supermassive black holes. *Physics Today* **67** (5), 37–42
2. 科技新報 (2023 年 01 月 17 日) 有種恆星走上特殊軌道，反覆被超大質量黑洞撕開外層 <https://today.line.me/tw/v2/article/3NE1r1B>
3. 維基百科 (2013 年 10 月 25 日)
https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Star_types.svg
4. 維基百科 (2022 年 9 月 9 日) 麵條化
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%BA%B5%E6%A2%9D%E5%8C%96>
5. 維基百科 (2022 年 11 月 22 日) 潮汐瓦解事件
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%BD%AE%E6%B1%90%E7%93%A6%E8%A7%A3%E4%BA%8B%E4%BB%B6>
6. 臺北市立天文科學教育館 (2024 年 03 月 07 日) 恆星被黑洞撕裂的罕見發現
https://tam.gov.taipei/News_Content.aspx?n=EF86D8AF23B9A85B&sms=F32C4FF0AC5C2801&s=5A4E6FCFC0B4C601

【評語】160028

本作品討論大質量黑洞附近的 tidal disruption event (TDE)。
作者使用星團來近似一顆恆星內部的質量，探討恆星物質的逃逸比例
與吸積率演化。作品中數值模擬與分析的工作表現不俗，執得肯定。
但是因為模擬中只考量重力的作用，整個事件被過度簡化。建議應加
入更多的物理機制考量，假如能有獨特的觀點就更好了。