



IPS Winter Chat

# 星系團中的黑洞噴流

林彥興 | 2023.02.12

# 大綱

## ➤ 背景介紹

- 星系團 Galaxy Clusters：宇宙的最大的重力束縛天體
- 星系團內介質 ICM：目不可視的炙熱氣體
- 冷卻流問題 Cooling flow problem
- 黑洞與星系的共同演化：活躍星系核回饋 AGN Feedback
- 方法：磁流體力學模擬 MHD Simulations
- 研究：奇異電波圈 Odd Radio Circles, ORCs

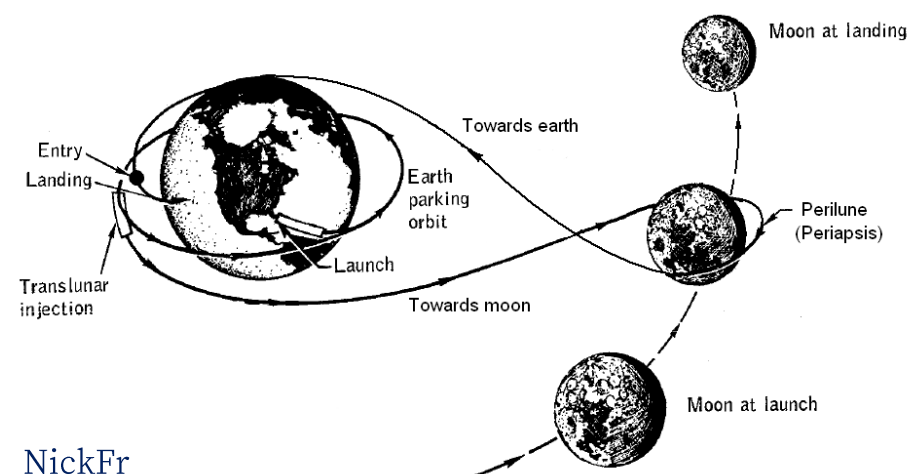
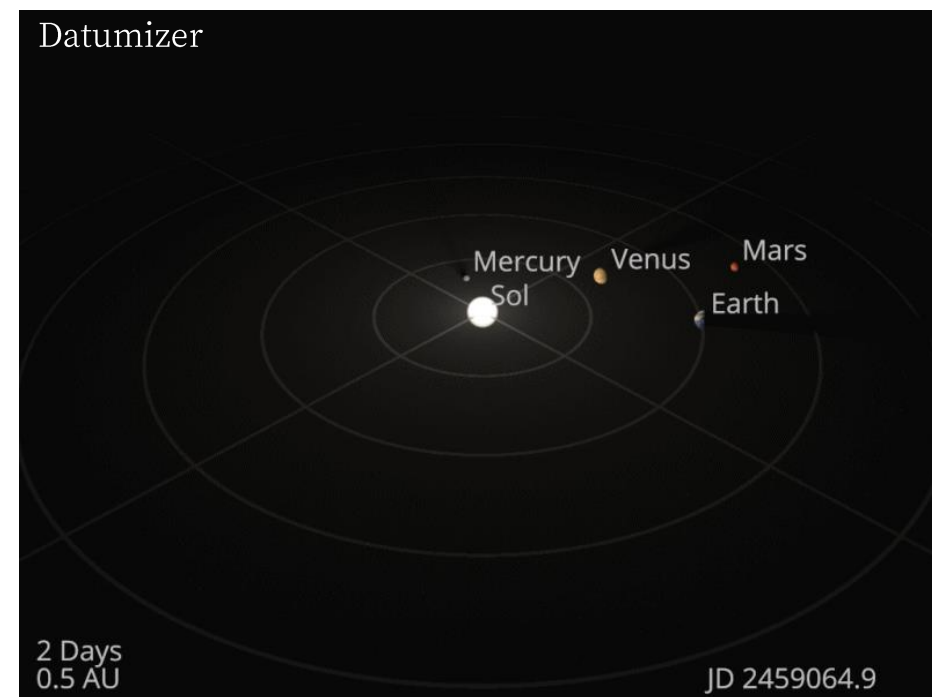
背景

# 星系團與 AGN 回饋

# 回顧：宇宙的階層

高中地科：

行星 → 恆星 → 星系 → 星系團 → 宇宙網



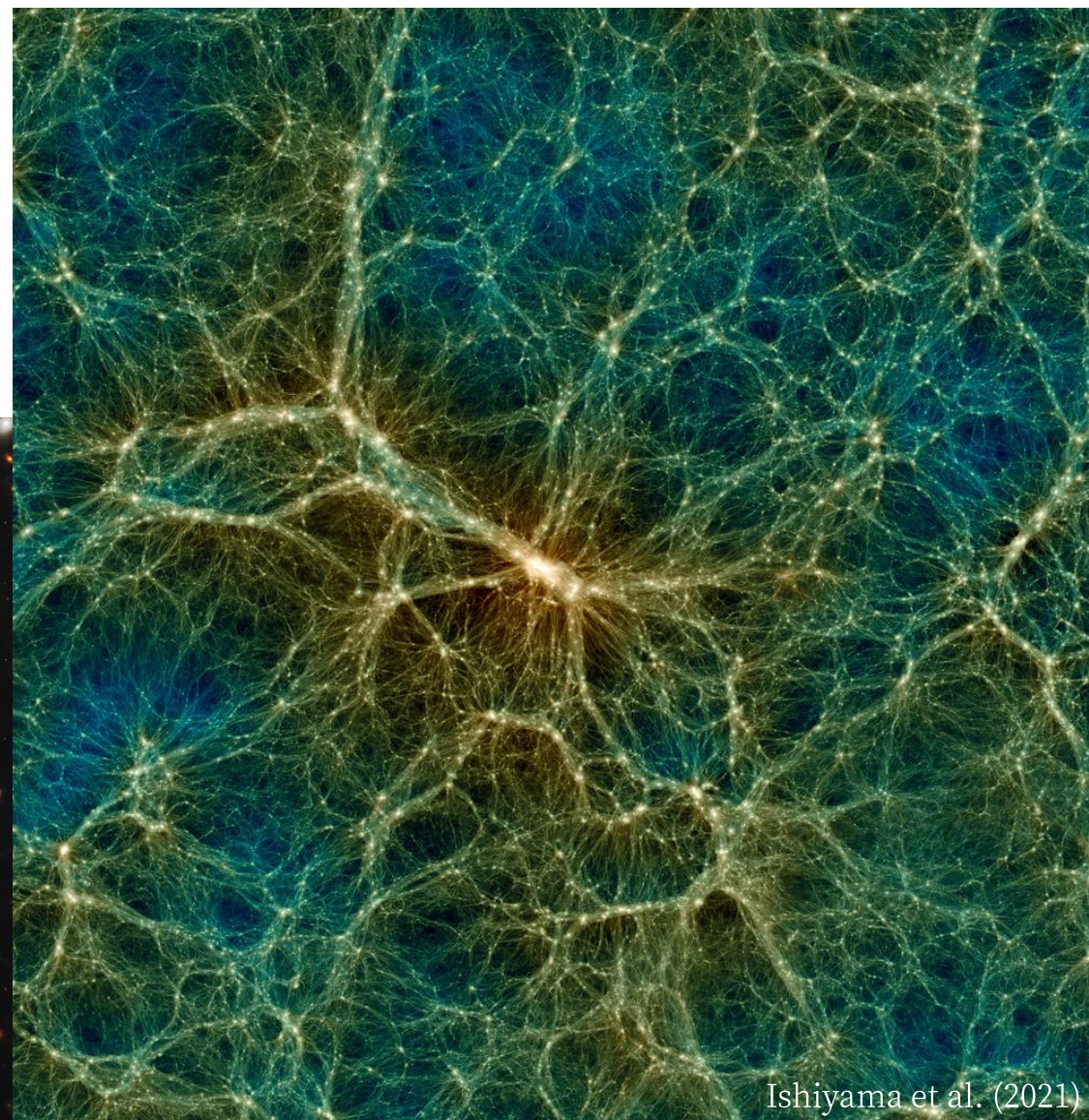
NickFr



# 回顧：宇宙的階層

高中地科：

行星 → 恆星 → 星系 → 星系團 → 宇宙網





## 可見光影像

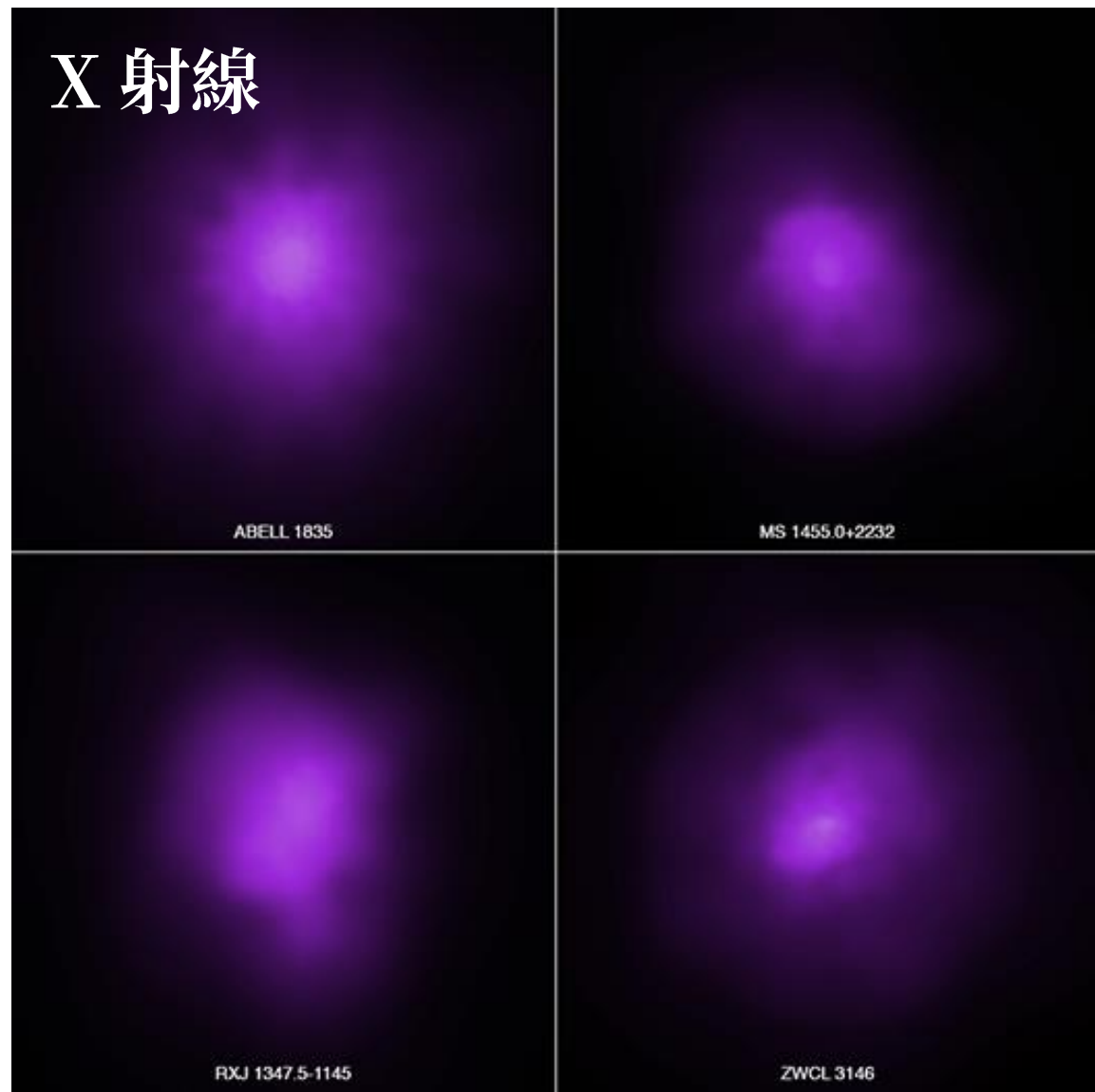


## 星系團 Galaxy Clusters

宇宙中最大的重力束縛系統

- 質量： $\sim 10^{14-15}$  太陽質量  
85% 暗物質、15% 一般物質
- 大小：數百萬光年
- 組成：約 1000 個星系
  - 星系一般較大、較紅
  - 中心：星系團最亮星系 BCG
  - 週圍：衛星星系 Satellites

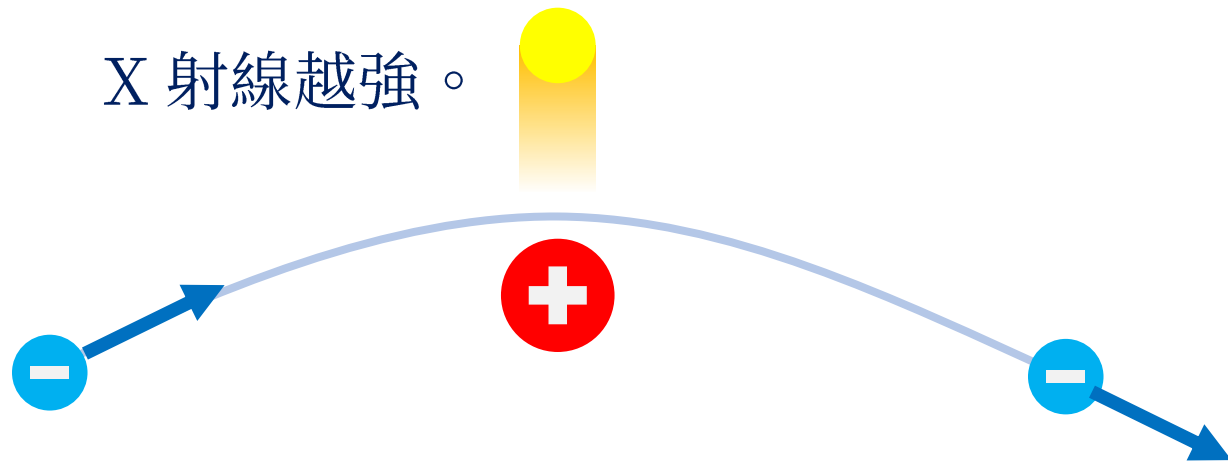
## X 射線



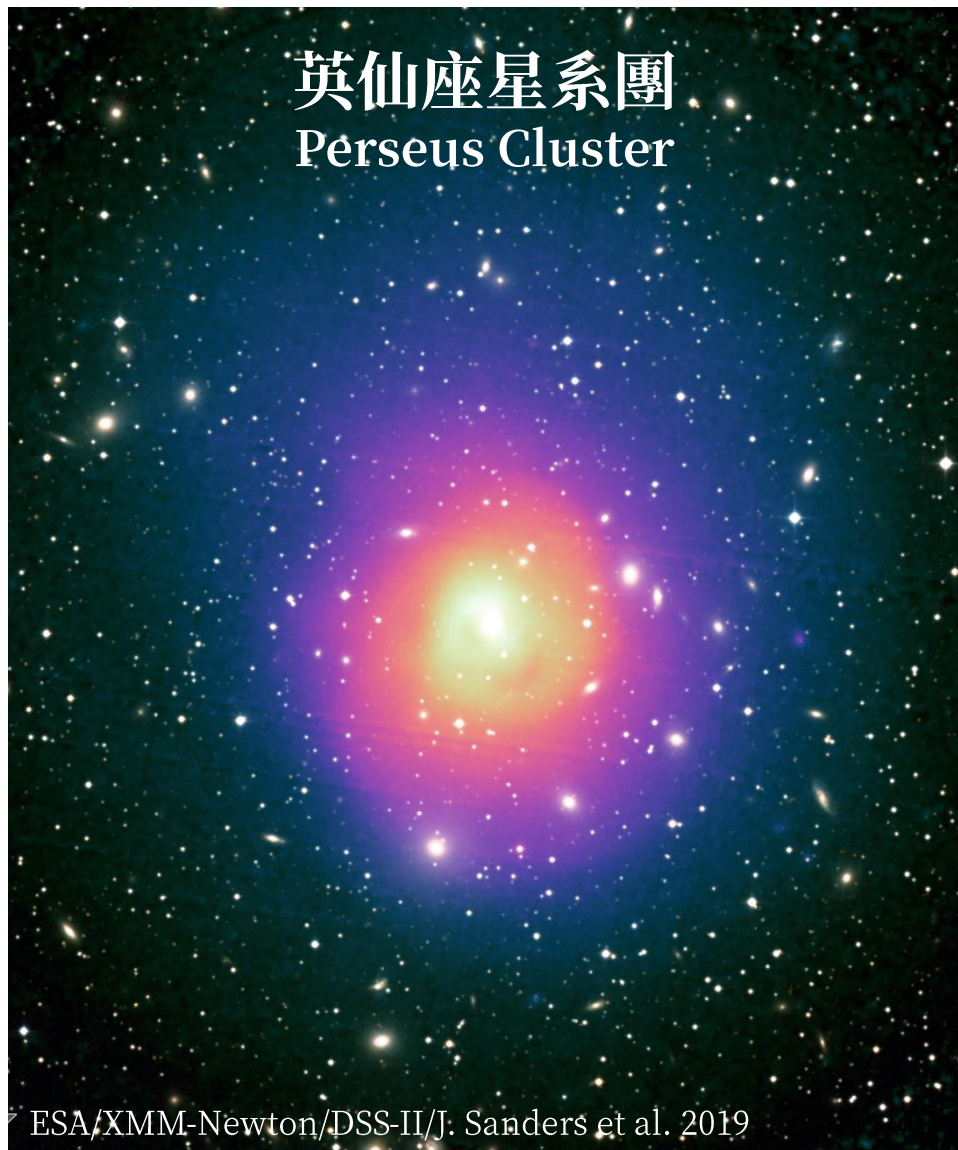
## 星系團內介質 ICM

充斥星系團內的高溫稀薄氣體

- 質量：星系團中一般物質的 90%
- 溫度： $10^7$ - $10^8$  K
- 輻射機制：煞車輻射 Bremsstrahlung
- 越靠近中心，ICM 密度越高、發出的 X 射線越強。



英仙座星系團  
Perseus Cluster



## 冷卻流問題 Cooling Flow Problem

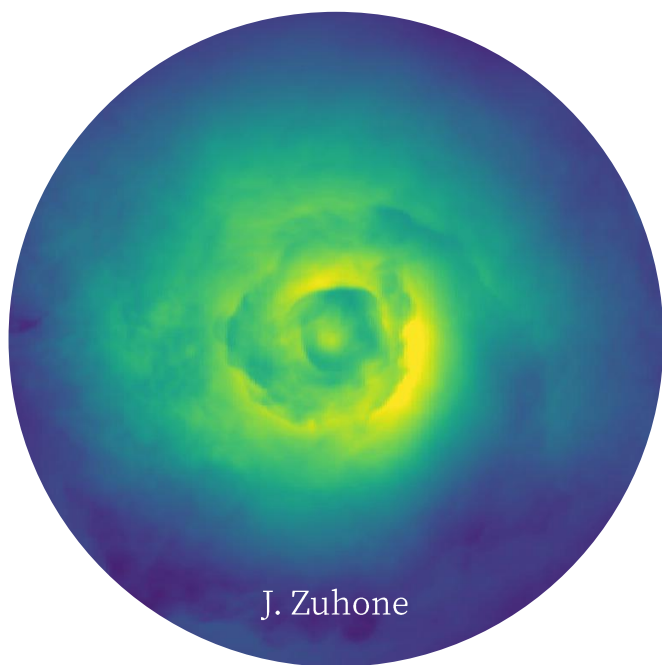
- 有些星系團在 X 射線波段「太亮了」。
- 從 X 射線觀測：  
發出 X 射線 → 失去能量 → 壓力降低 →  
冷卻的氣體落入中心 BCG → 大量恆星形成
- 從可見光觀測：  
BCG 恆星形成率比預期低一個數量級
- 為甚麼會這樣呢？  
這被稱為冷卻流問題 Cooling Flow Problem



# 如何解決冷卻流問題？

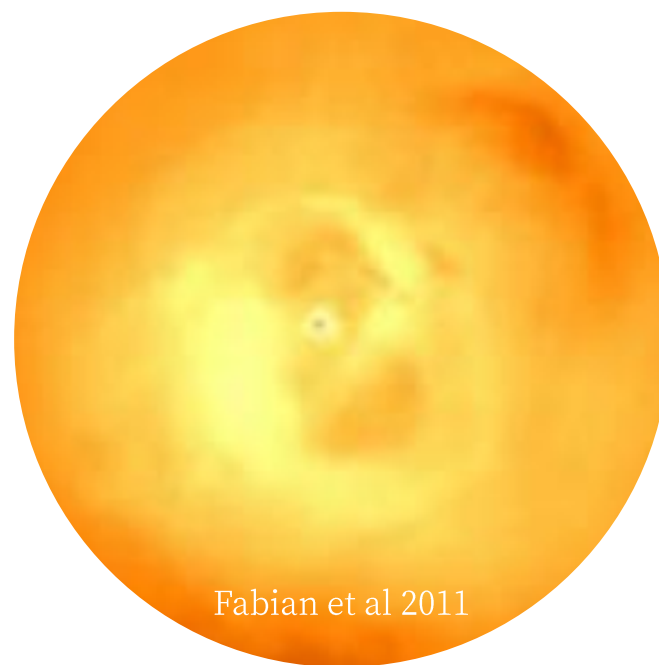
想避免冷卻流的出現，就需要能夠加熱 ICM 的機制

---



J. Zuhone

氣體晃盪 Gas Sloshing

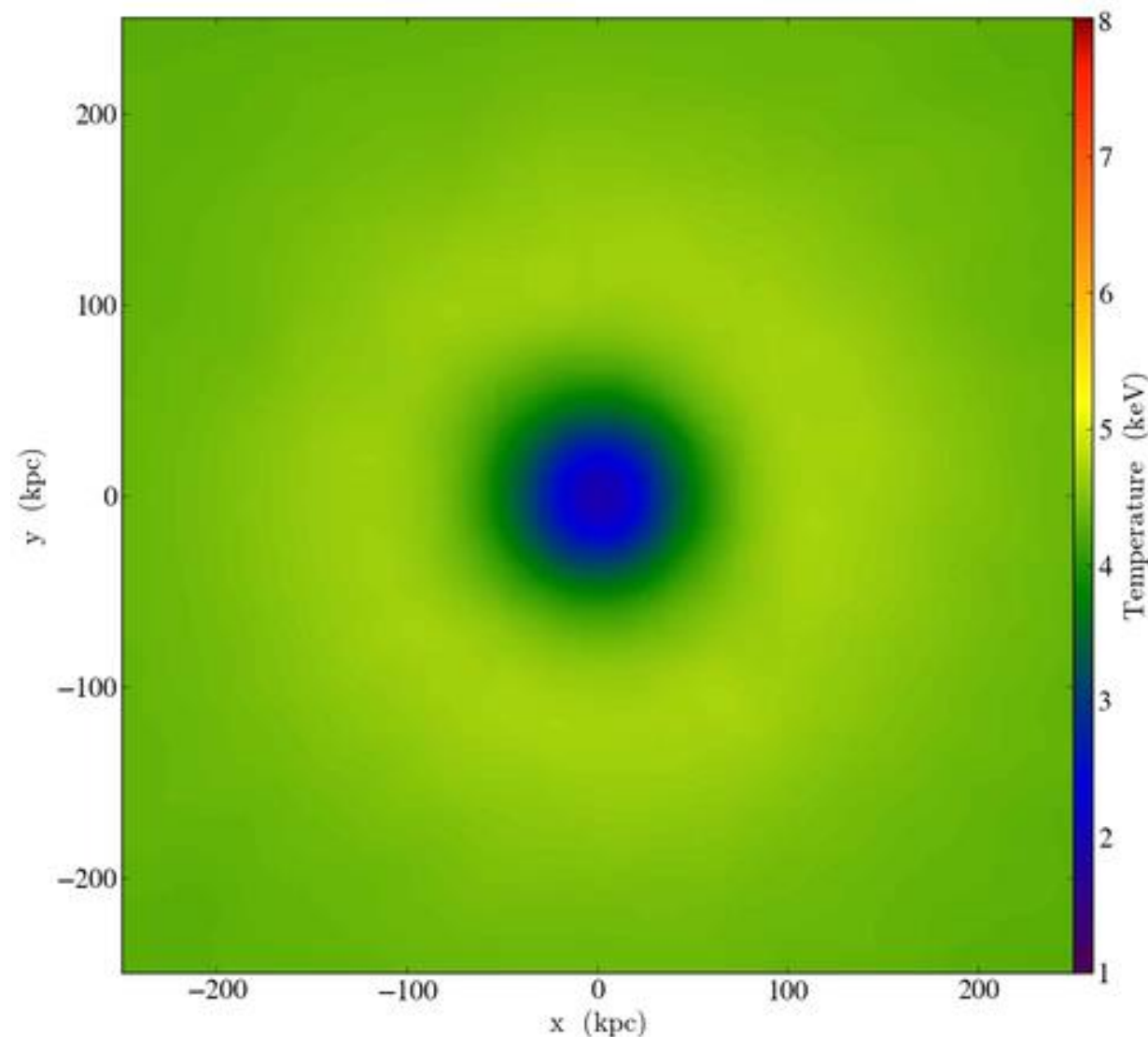


Fabian et al 2011

黑洞噴流 AGN Jets

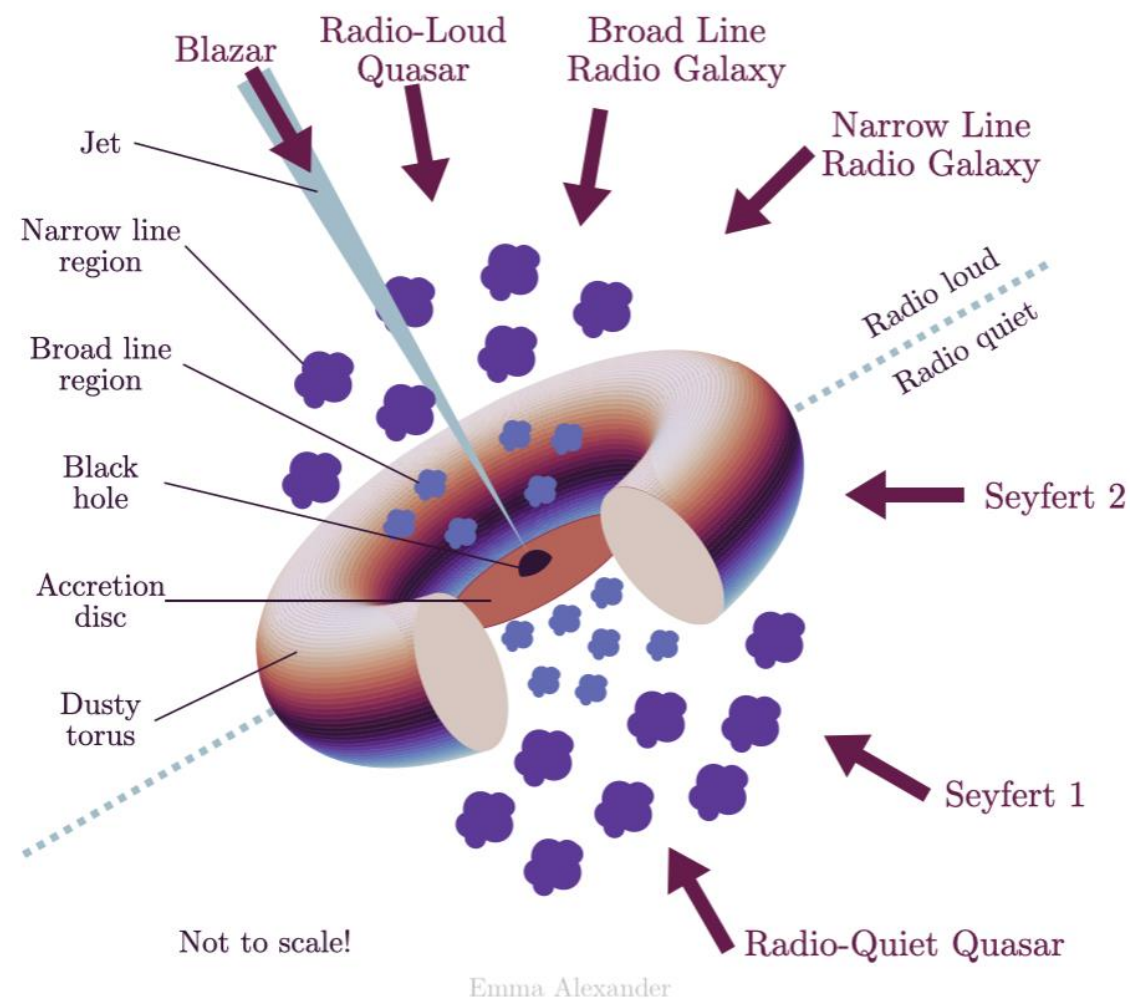
## 氣體晃蕩 Gas sloshing

- 星系團的一生中會經歷多次大大小小的「合併 merger」事件。
- 質量相當的合併：Major Merger  
一大一小的合併：Minor Merger
- 當小星系掉入星系團中，  
小星系的重力場會攪動並加熱 ICM。
- 問題：晃蕩的發生取決於星系合併  
並不是一個「負回饋」的機制



# 活躍星系核回饋 AGN Feedback

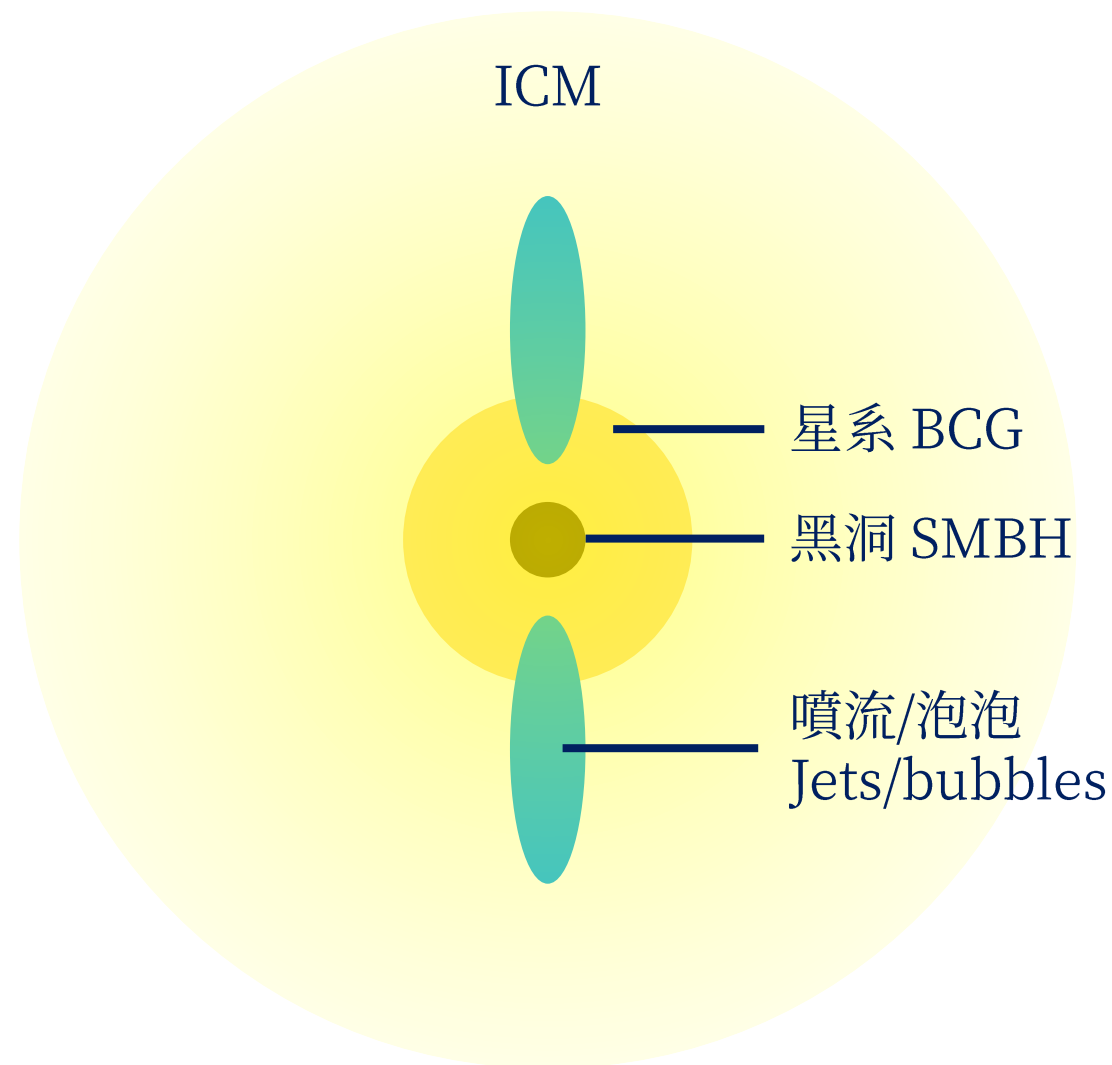
- 星系中心都有「超大質量黑洞 SMBH」
- 當氣體被黑洞吸積，將釋放巨大的能量，成為「活躍星系核 AGN」。
- AGN 釋放的能量將影響星系演化，稱為活躍星系核回饋 AGN Feedback
- 活躍星系核的功率可以達到  $10^{42}$  W 約是銀河系的數十萬倍
- 適當條件下，AGN 會以噴流釋放能量





# 星系團中的黑洞噴流

- 動力學過程 Dynamics :
  - 氣體冷卻後被 BCG 的黑洞吸積
  - 黑洞從 BCG 中心發射噴流
  - 噴流穿過星系，進入 ICM 產生震波
  - 噴流在 ICM 中形成「泡泡 Bubbles」
  - 泡泡因浮力上浮並最終破碎消散
- 噴流的能量逐漸轉移給 ICM，阻止冷卻流的形成，形成負回饋循環
- 此機制被稱為 Jet mode feedback

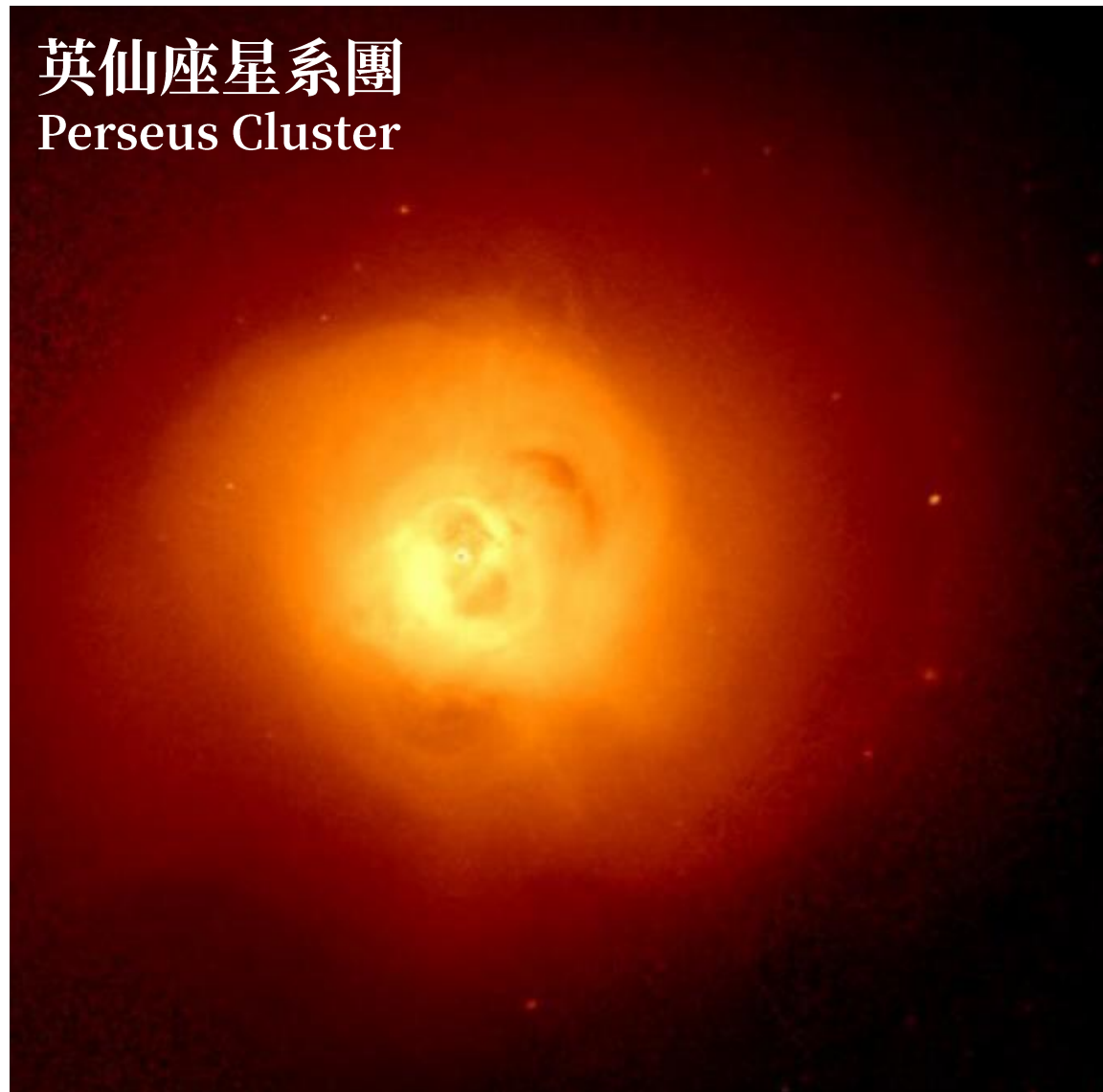


非實際比例

# 觀測星系團中的黑洞噴流

- Jet mode feedback
  - 擁有眾多觀測證據支持
- X 射線「空洞 Cavity」
- 為什麼會有空洞？
  - X 射線來自煞車輻射
  - 煞車輻射  $\propto \rho^2 T^{\frac{1}{2}}$
  - 低密度的泡泡亮度較低

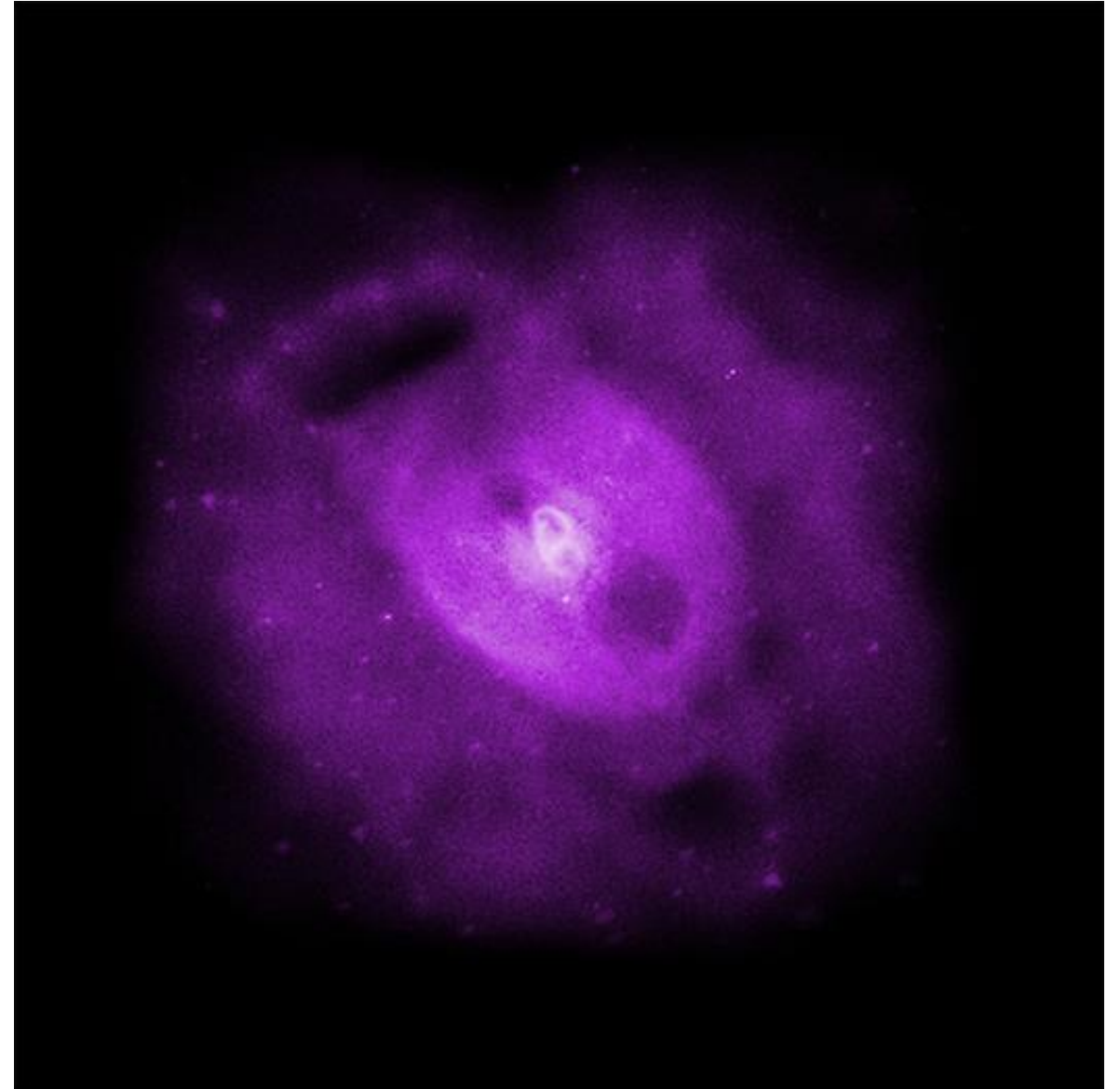
英仙座星系團  
Perseus Cluster



# NGC 5813 星系群



X-ray: NASA/CXC/SAO/S.Randall et al., Optical: SDSS

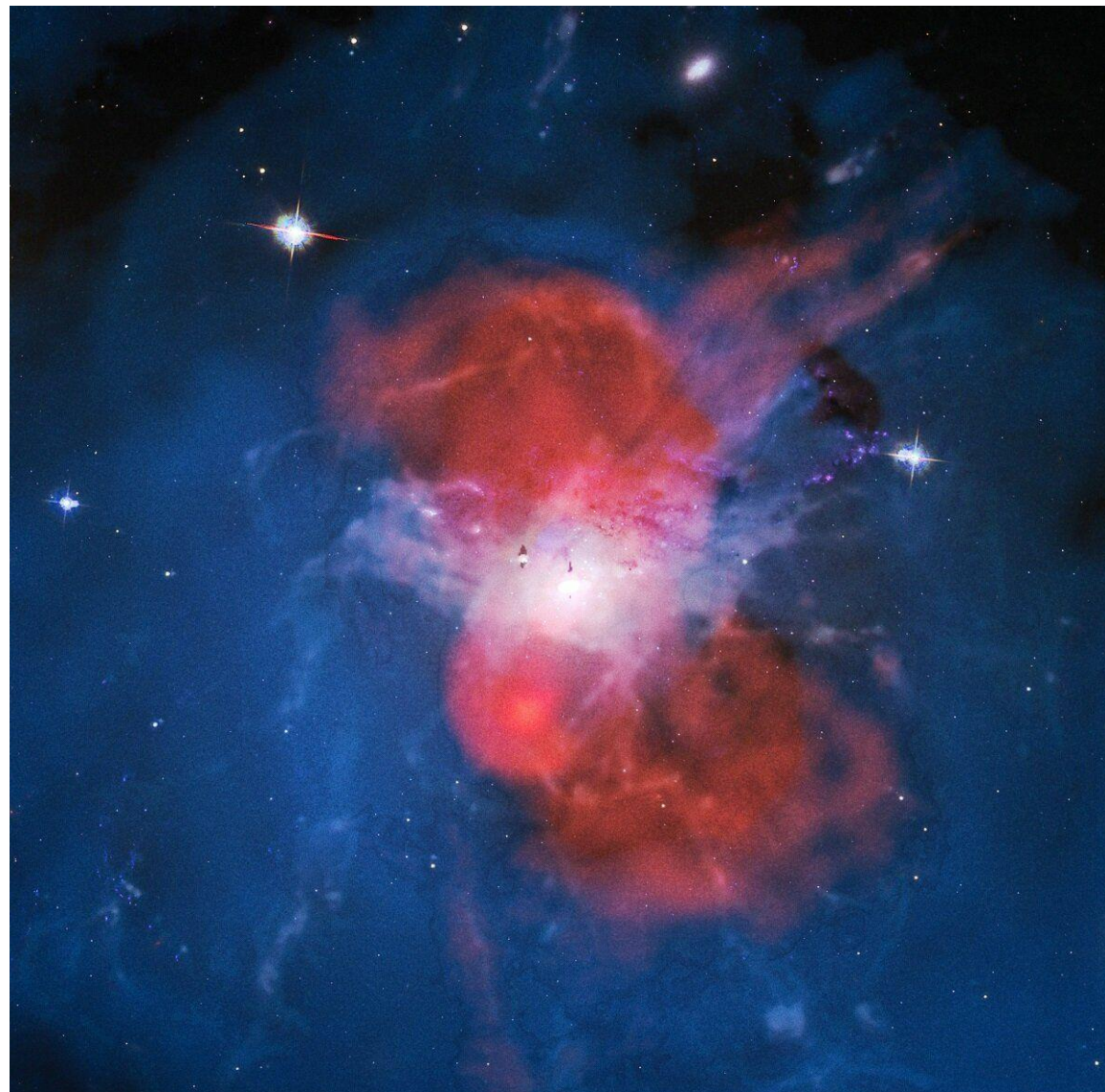
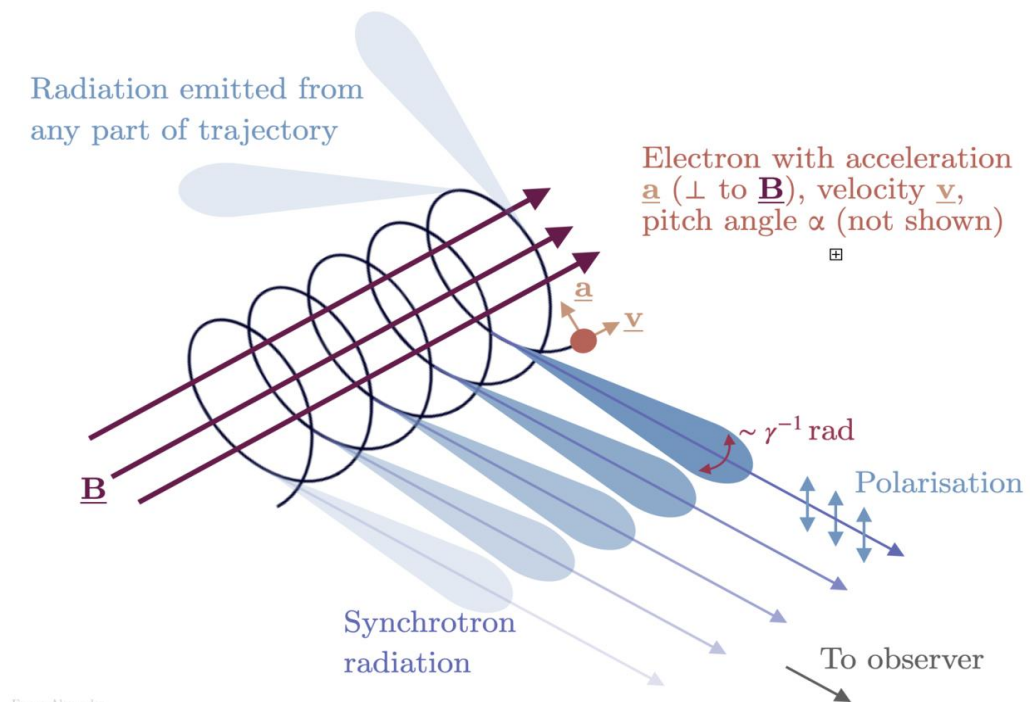




# 觀測星系團中的黑洞噴流

➤ 電波瓣 Radio Lobe

同步輻射 Synchrotron





# Active Galactic Nuclei (AGN) Jets

Galaxy

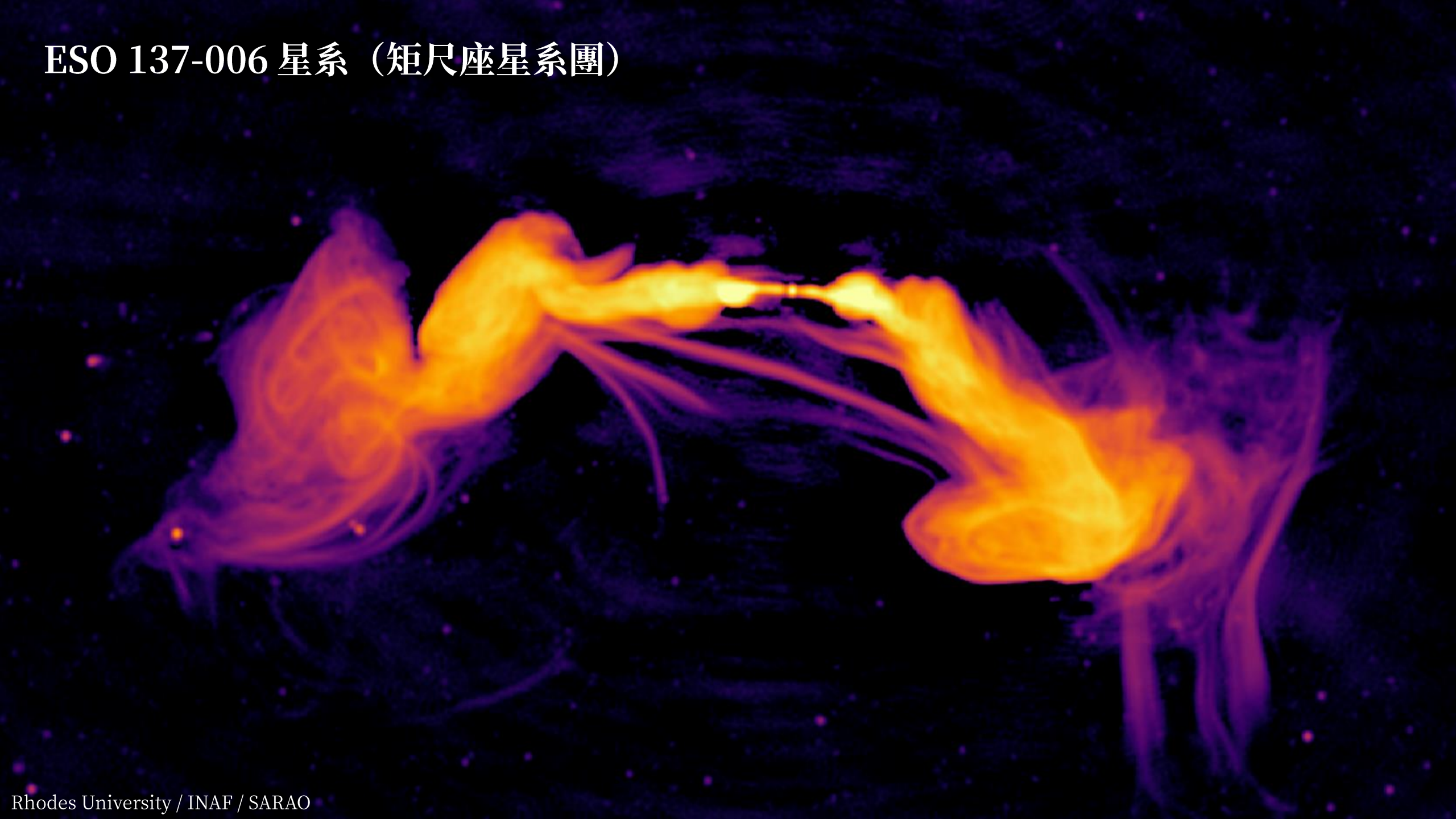
Black hole

# 半人馬座 A 星系

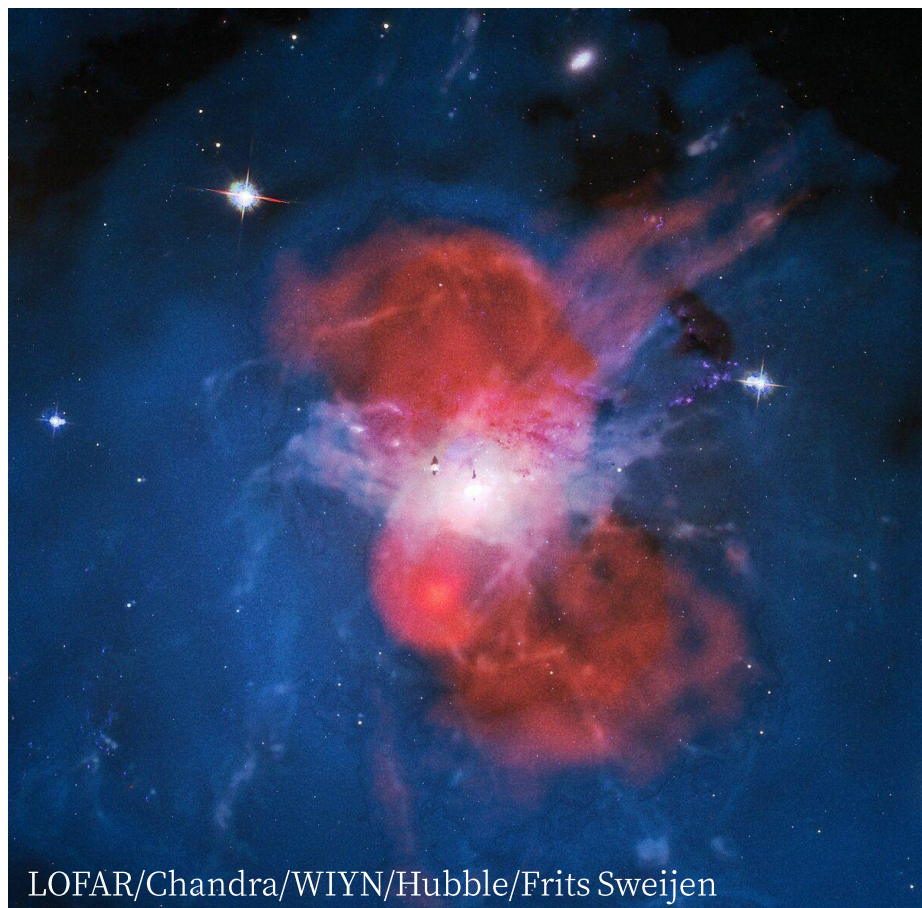




# ESO 137-006 星系（矩尺座星系團）



# 觀測泡泡的性質

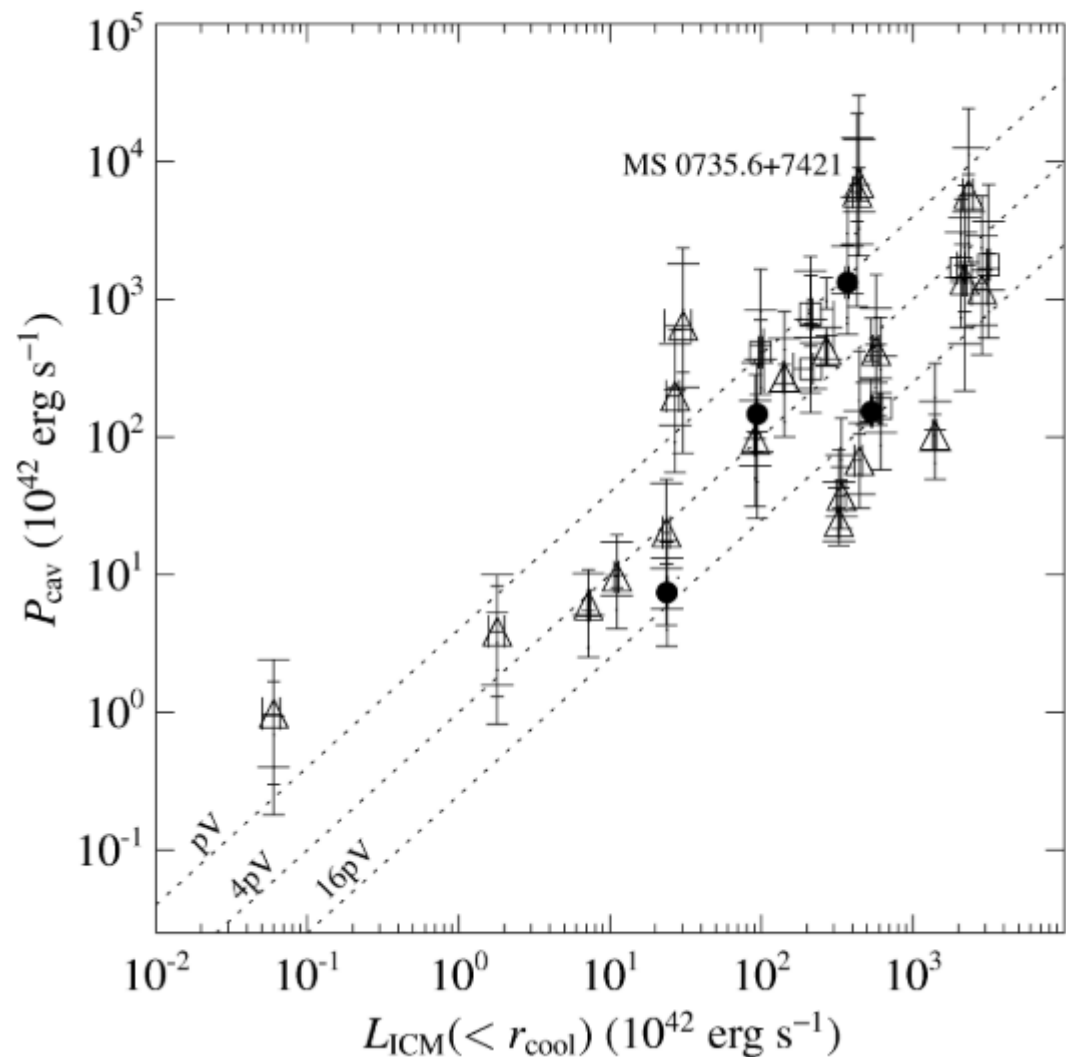


- X-ray : ICM 的溫度與壓力
  - 泡泡的總能量
  - 泡泡的年齡
  - 泡泡的功率 (Cavity Power)
- Radio : 泡泡的磁場和宇宙射線
  - 無線電光度 Radio luminosity
  - 磁場與相對論性電子能量密度



# AGN 回饋的觀測證據

- 泡泡功率（加熱）  
X 射線光度（冷卻）  
有橫跨多個數量級的正相關
- 無線電光度—X 射線光度  
黑洞質量—星系質量（M-sigma relation）  
等特性也有類似關係
- 佐證 AGN 回饋確實存在  
是影響星系演化的重要推手



Rafferty et al. 2006

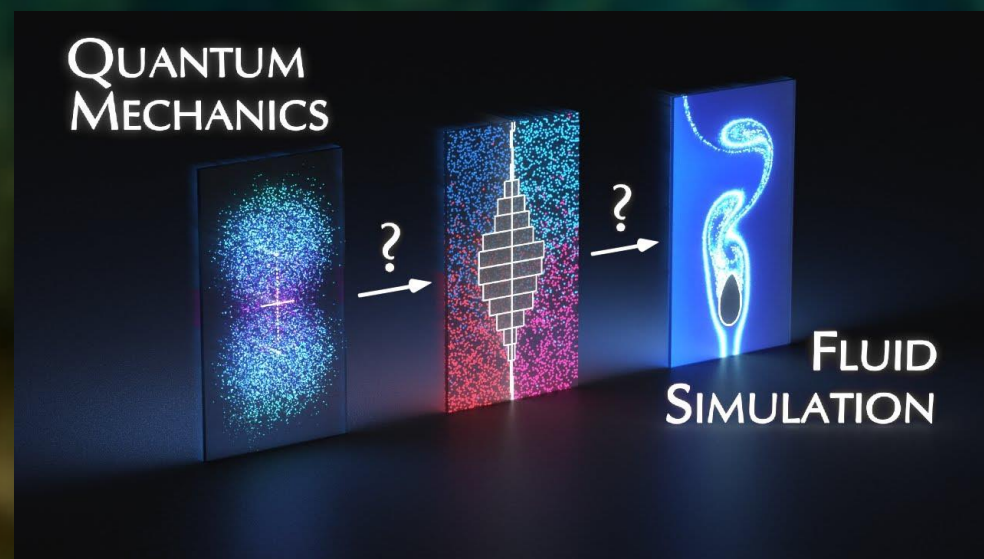


方法

# 磁流體力學模擬 MHD Simulations

# 流體力學與天文物理

- 任何理論模型都是對真實世界的有效近似
- 天文物理考慮的尺度：
  - 恆星： $10^{30}$  公斤  $\rightarrow$   $10^{57}$  顆原子  
光是儲存就需要  $10^{45}$  TB 的儲存空間
  - 大型宇宙學模擬： $> 10^{18}$  太陽質量
  - 光子、重力場、波函數、量子場……
- 勢必需要以宏觀統計性質簡化系統
- 流體近似是最常見、最強大的作法之一



Quantum mechanics to fluid simulation  
- the story of everything | braintruffle

# 流體力學與天文物理

## ➤ 物理學家的思考方式：

觀察系統 → 建立模型 → 寫下方程式 → 解方程式 → 詮釋結果

## ➤ 當氣體的「平均自由徑 mfp」遠小於系統的大小，氣體的行為可以用流體近似，並以溫度、密度、壓力等宏觀性質進行描述。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \text{質量守恆 Mass Conservation}$$

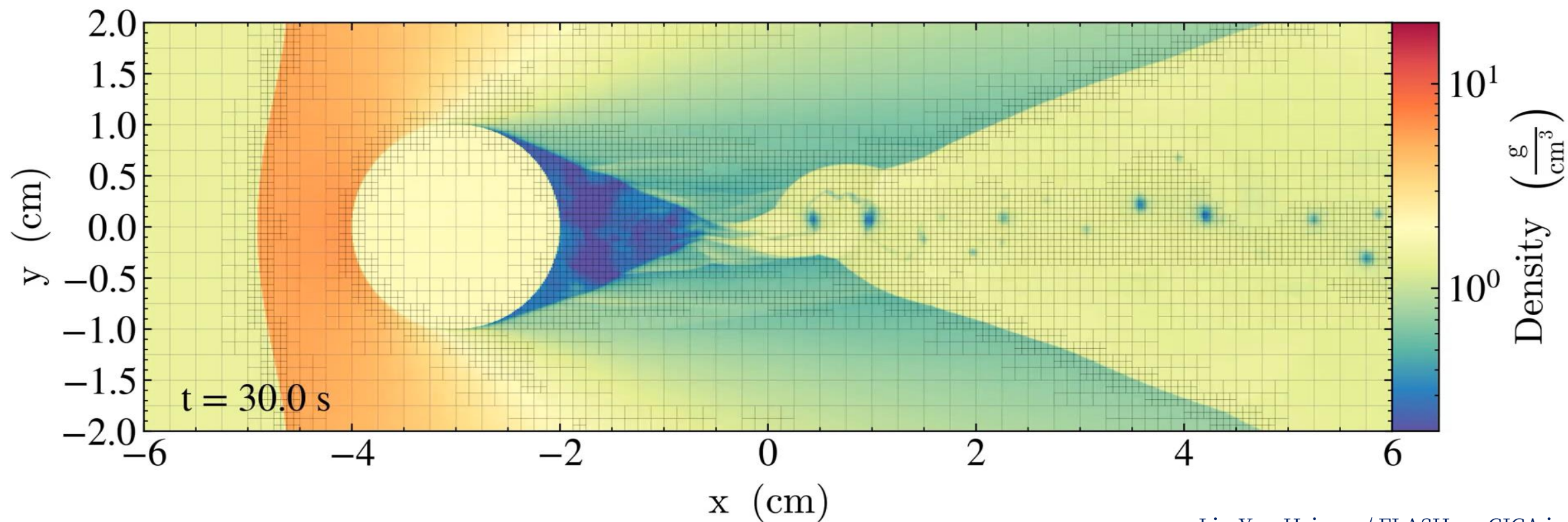
$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \nabla p_{\text{tot}} = \rho \mathbf{g} \quad \text{動量守恆 Momentum Conservation}$$

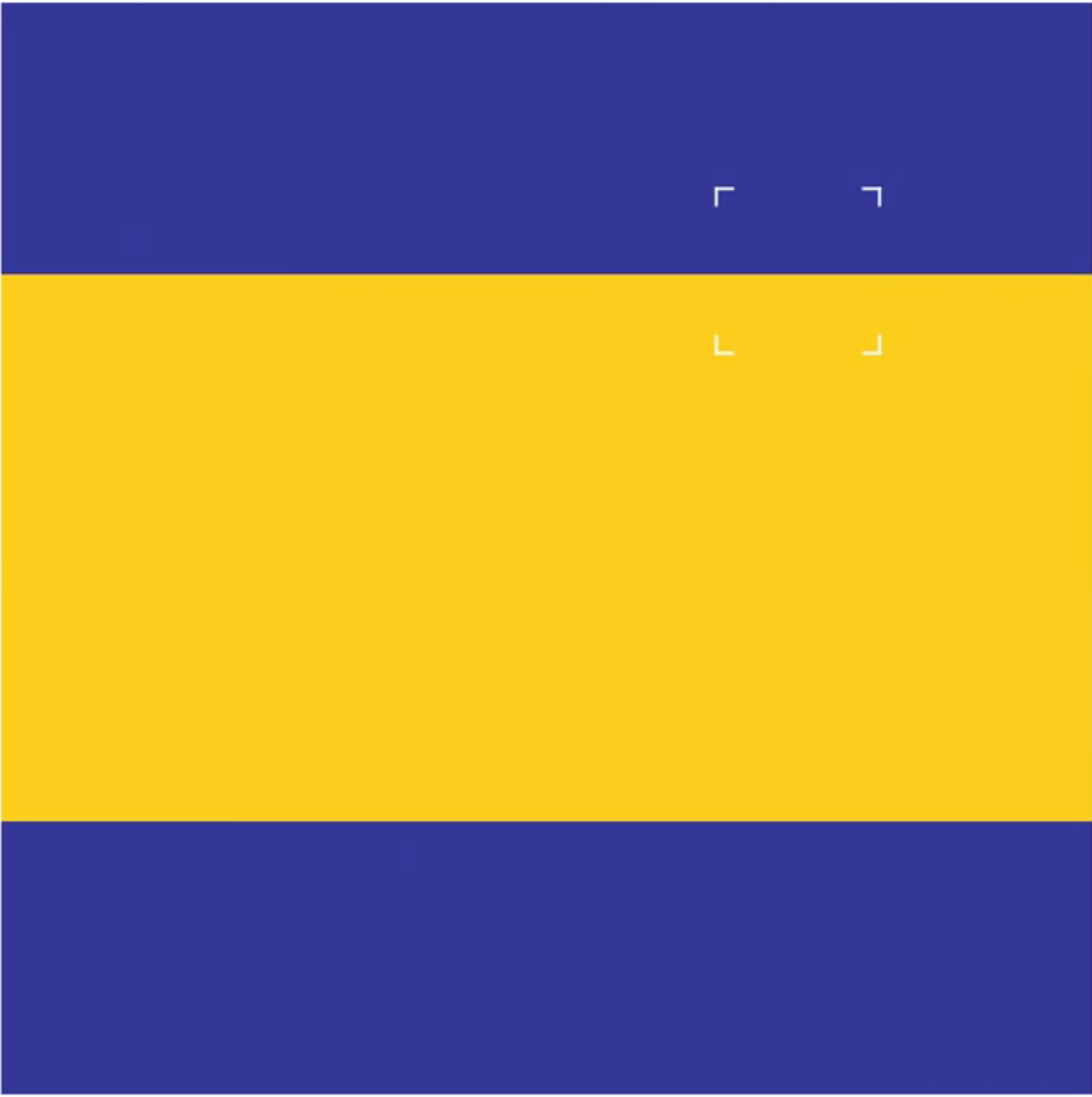
$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot [(e + p_{\text{tot}}) \mathbf{v}] = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} \quad \text{能量守恆 Energy Conservation}$$



# 解算方程組：Grid Based Method

- 有了方程式，接下來就是用電腦幫我們解開它們。
- 一種常用方法是「有限體積法 Finite Volume Method, FVM」加上「自適應網格 Adaptive Mesh Refinement, AMR」。

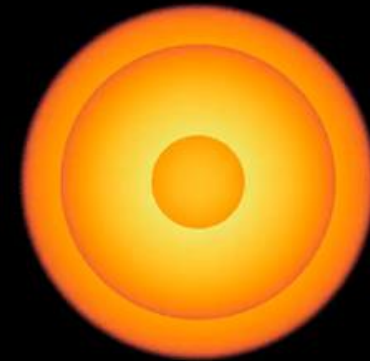




## 解算方程組：SPH Method

- 另一種常見的方法稱為  
光滑粒子流體動力學法  
Smoothed Particle Hydrodynamics
- 用一顆一顆的粒子代表流體

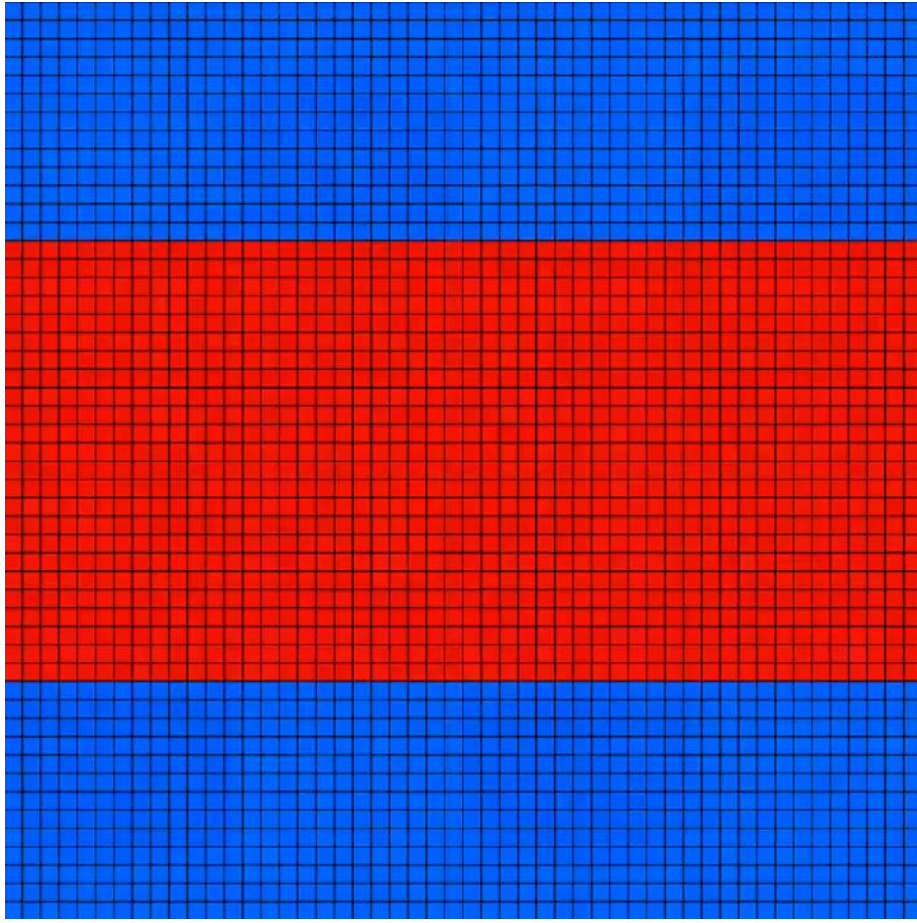
0.0 h



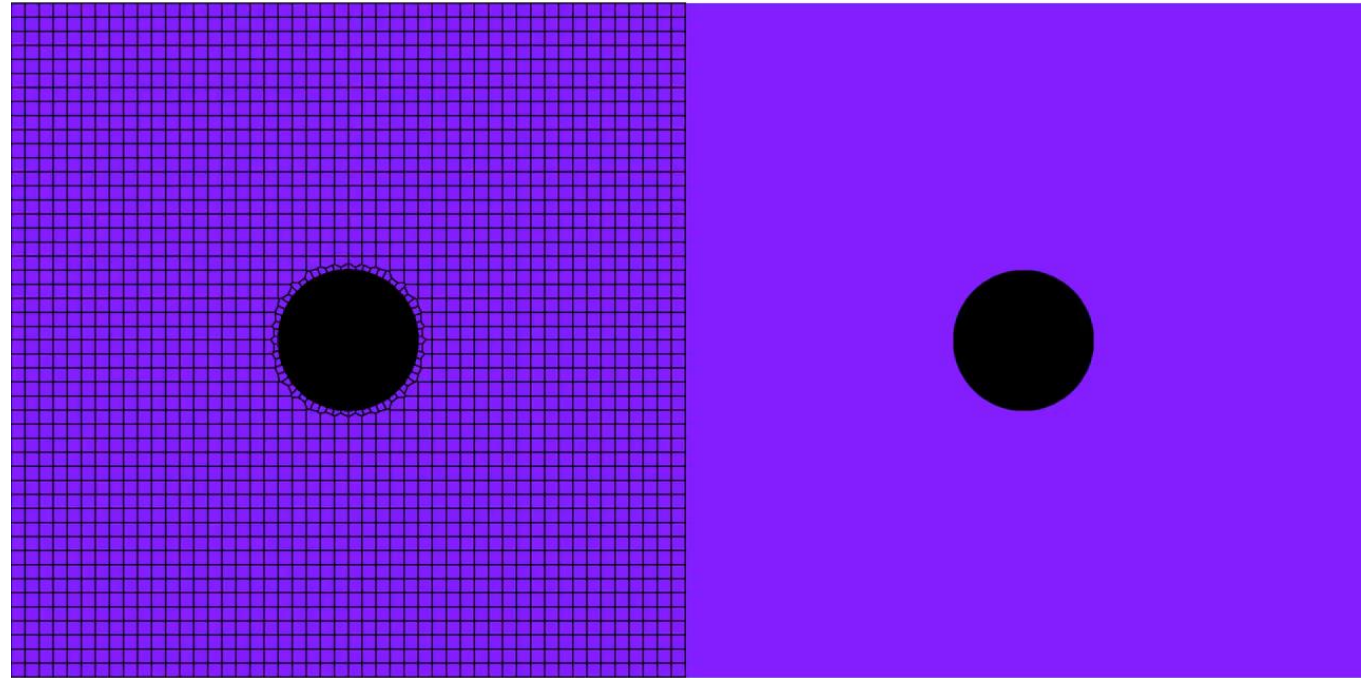
ICC planetary giant impact research



# 解算方程組：Hybrid / Moving Mesh Method



- 結合 FVM 和 SPH 各自的優勢



# 磁流體力學 MHD

- 宇宙中磁場幾乎無處不在，且在許多系統中皆扮演著重要的角色。
- 在流體力學的基礎上，可以進一步加入磁場的影響：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right) + \nabla p_{\text{tot}} = \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$$

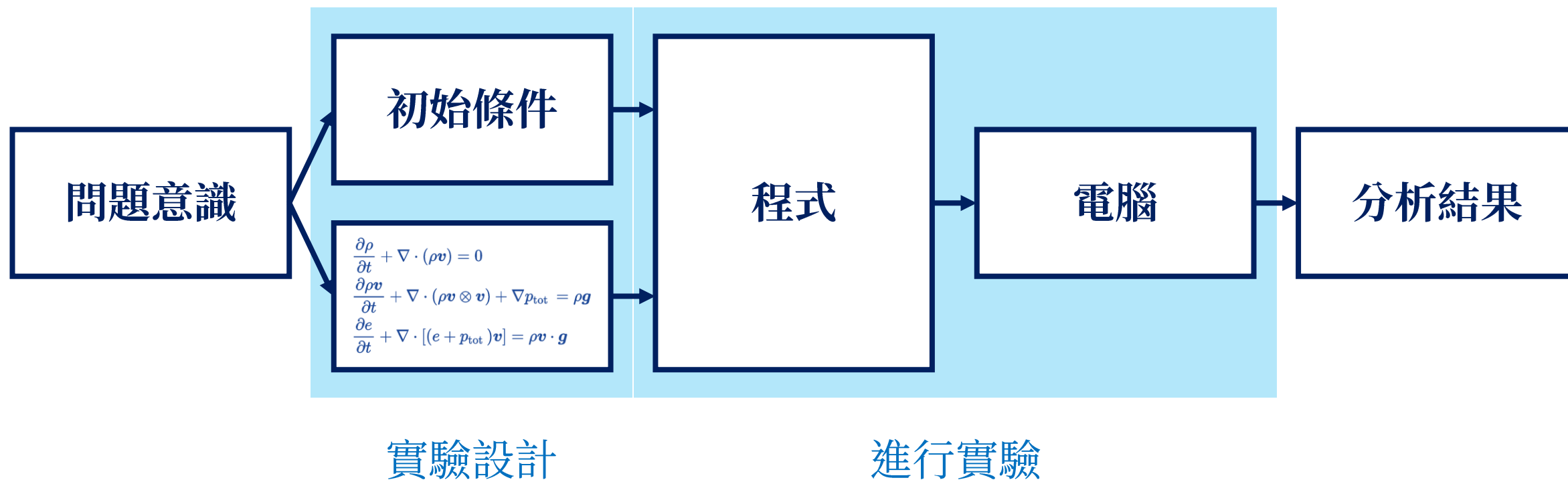
$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ (e + p_{\text{tot}}) \mathbf{v} - \frac{\mathbf{B}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{v})}{4\pi} \right] = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g}$$

根據模擬的系統，這套方程組可以再加入

- 宇宙射線 Cosmic-Ray
- 輻射 Radiation
- 黏滯性 Viscosity
- 電阻 Resistance
- 相對論效應 Relativity
- 恆星與 AGN 回饋……等

# 流體力學與天文物理

## ➤ 計算天文物理模擬的基本流程



## ➤ 計算天文物理是理論工作，但是研究流程其實類似實驗

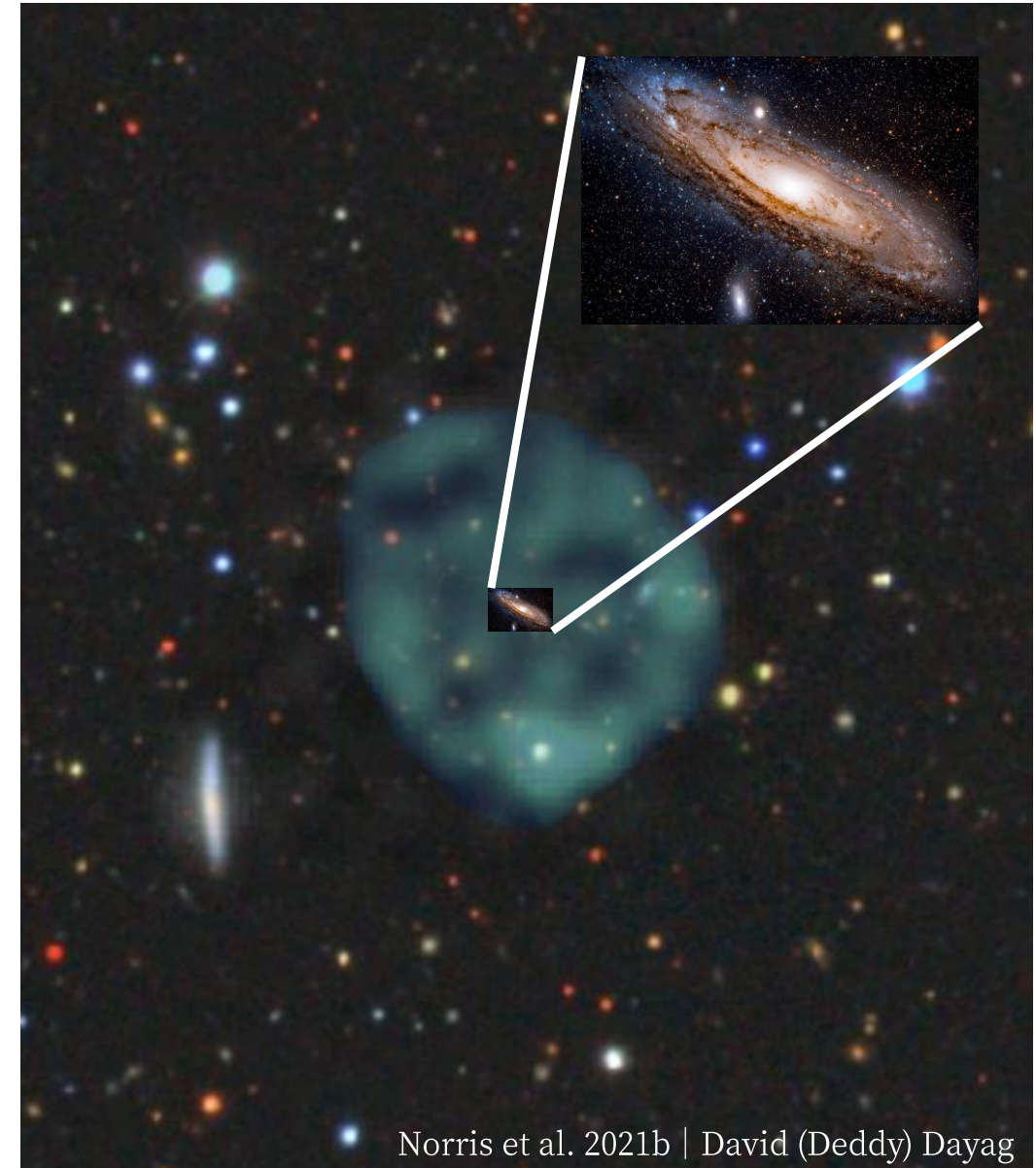


研究

# Odd Radio Circles as Cosmic-Ray dominated AGN jets

# 怪異電波圈 ORCs

- ORCs: Odd Radio Circles.
- Discovered: 2021 by ASKAP telescope.
- Important properties: (Norris+ 2022)
  - Low surface brightness  
(faint, hard to see)
  - Edge brightening
  - Large ( $R \sim 250$  kpc)
- **Origin unknown.**

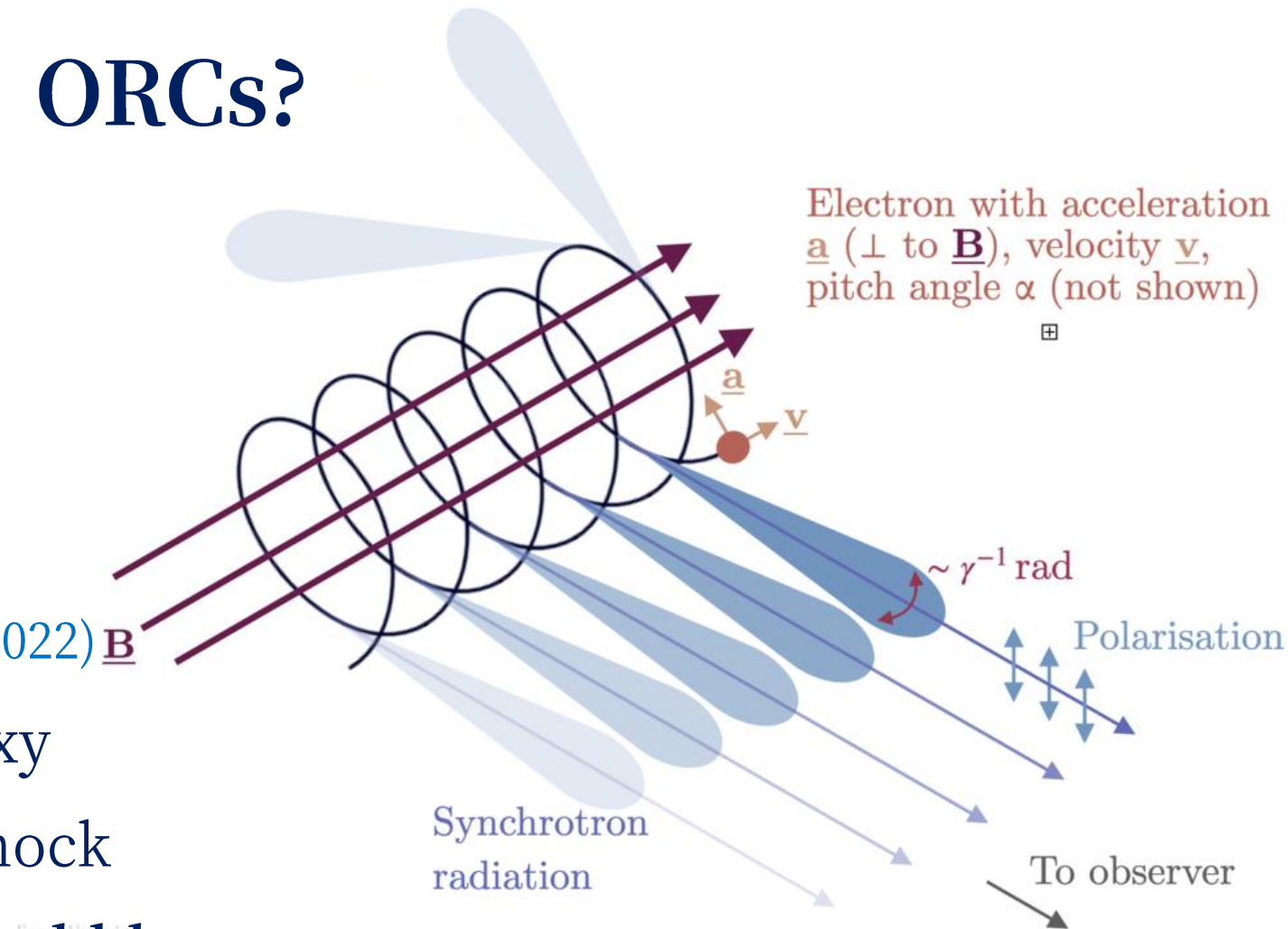


Norris et al. 2021b | David (Deddy) Dayag

## Introduction

# What is the origin of ORCs?

- Emission mechanism:  
**Synchrotron radiation.**
- How to create synchrotron?  
**B field and cosmic-rays (CR).**
- Possible explanation: (Norris+ 2022) **B**
  1. Explosion in the host galaxy
  2. Star formation terminal shock
  3. **End-on AGN jet inflated bubbles.**





# Active Galactic Nuclei (AGN) Jets

Galaxy

Black hole

# CR-MHD: Treating CR as a second fluid

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right) + \nabla p_{\text{tot}} = \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ (e + p_{\text{tot}}) \mathbf{v} - \frac{\mathbf{B}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{v})}{4\pi} \right] = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla e_{\text{cr}}) + \mathcal{H}_{\text{cr}} + n_e^2 \Lambda(T)$$

$$\frac{\partial e_{\text{cr}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\underbrace{e_{\text{cr}} \mathbf{v}}_{\substack{\uparrow \\ \text{CR} \\ \text{advection}}}) = -\underbrace{p_{\text{cr}}}_{\substack{\uparrow \\ \text{Adiabatic} \\ \text{term}}} \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (\underbrace{\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla e_{\text{cr}}}_{\substack{\uparrow \\ \text{CR} \\ \text{diffusion}}}) + \underbrace{\mathcal{C}_{\text{cr}}}_{\substack{\uparrow \\ \text{CR cooling} \\ \text{(Hadronic, Sync, IC, etc)}}}$$

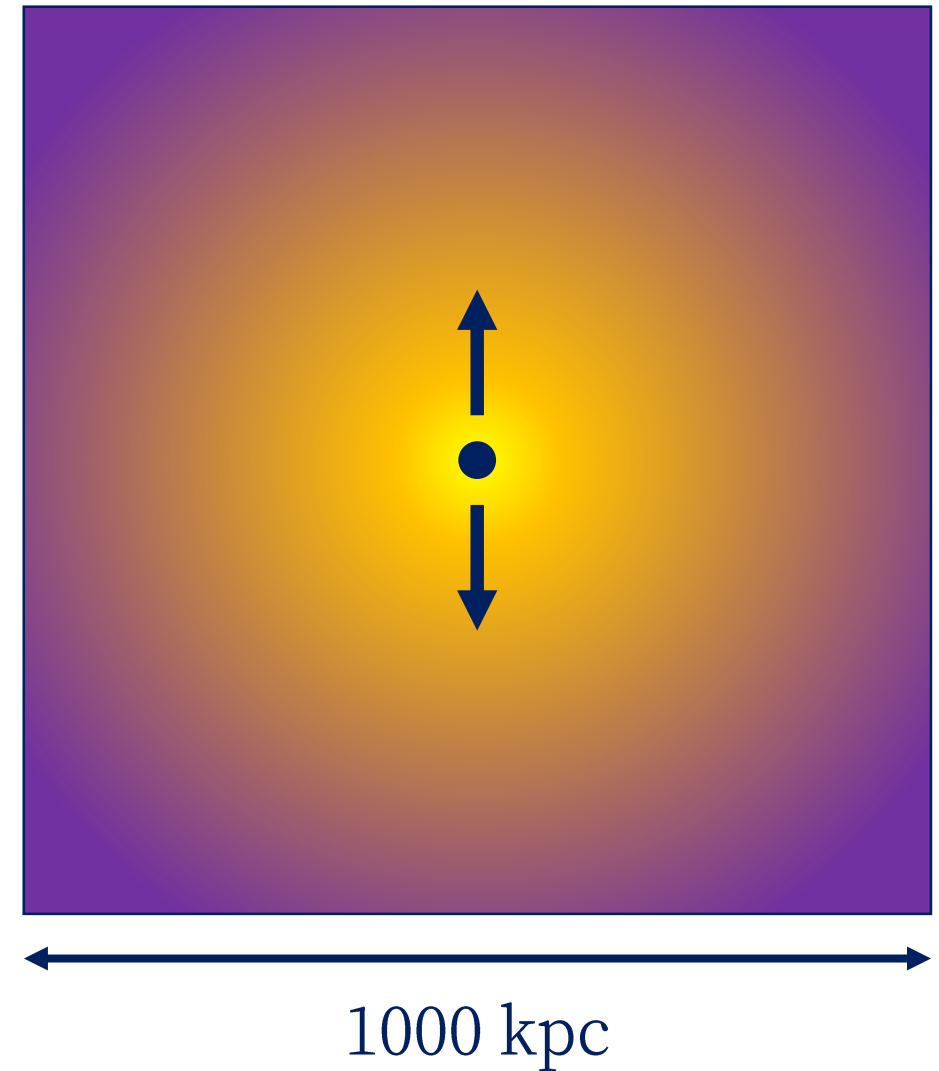
CR  
diffusion  
↓

CR effects on  
total energy  
↓

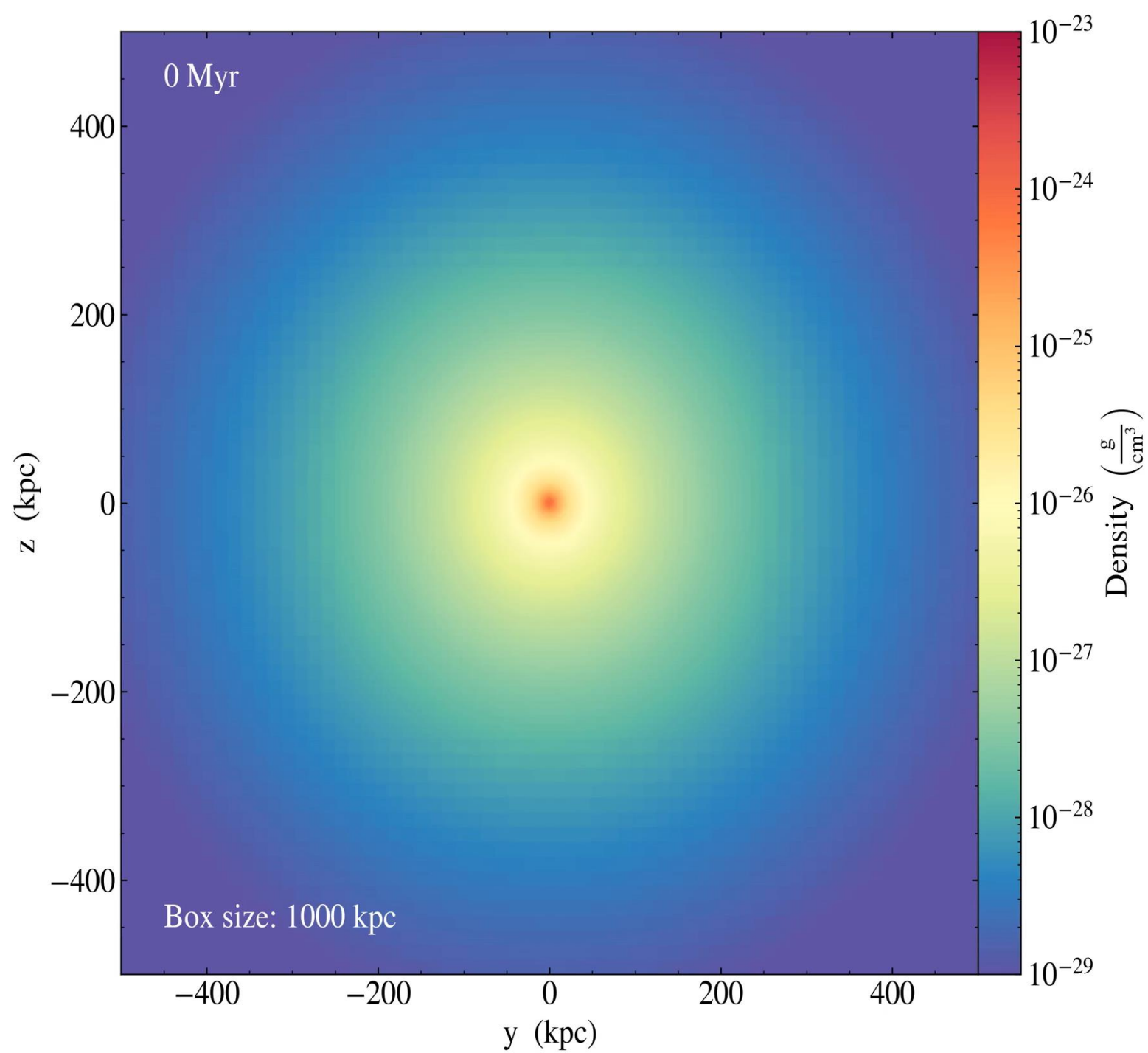
## Method

# Simulation setup

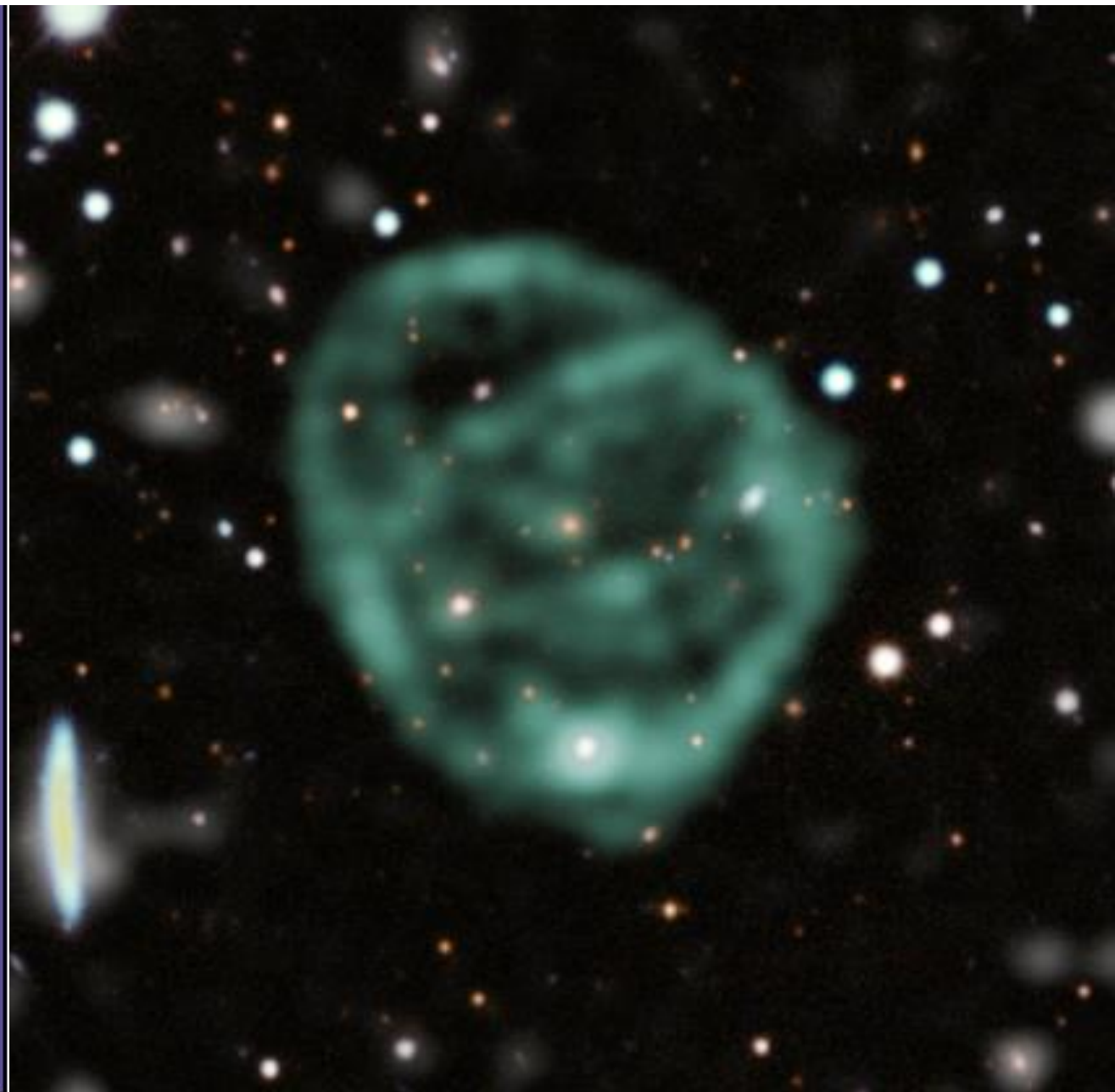
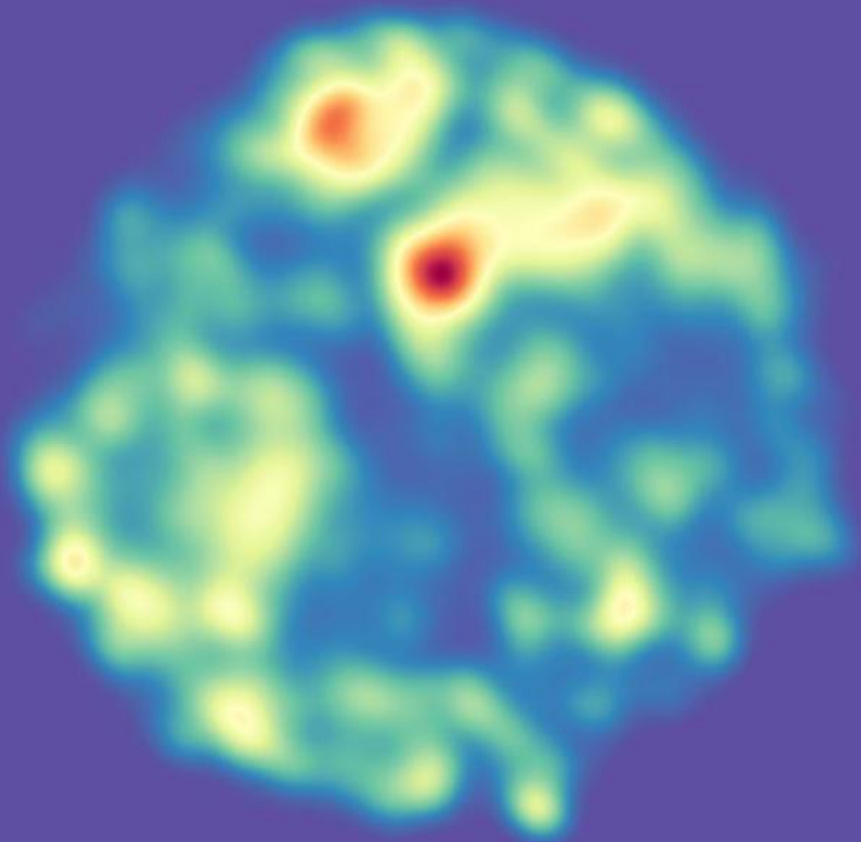
- Code: FLASH, modified to include CR.
- Box size: 1 Mpc; Resolution: 1 kpc.
- Initial condition: Mimic galaxy cluster.
- Jet: bipolar injection of energy and momentum from the center.
- Mock observation:  
yt package (python, widely used). Integrate  
Sync. emissivity to get radio morphology







198 Myr



## Summary

# ORCs as AGN jet inflated bubbles

- ORCs: New mysterious extragalactic radio objects
- Possible explanation: End on AGN jet inflated bubbles.
- Goal: Try to reproduce them with numerical simulations.
- Method: FLASH code with a galaxy cluster environment.
- Result: Circular, edge brightened radio object reproduced.



$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = \text{constant}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nu \nabla^2 \mathbf{u} = -\nabla \left( \frac{p}{\rho_0} \right) + \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \nabla p_{\text{tot}} = \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot [(e + p_{\text{tot}}) \mathbf{v}] = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g}$$

$$\partial_\nu T^{i\nu} = 0$$

$$\partial_0 T^{i0} + \partial_j T^{ij} = 0$$

$$\partial_t \left( \frac{1}{c^2} (\rho c^2 + p) v^i \gamma^2 \right) + \partial_j \left( \left( \rho + \frac{p}{c^2} \right) v^i v^j \gamma^2 + p \delta^{ij} \right) = 0$$



# NTHU IoA Feedback in Galaxies and Clusters

PI: Hsiang-Yi Karen Yang