

# **Ondas de choque en el Universo**

**Shock waves in the Universe**

**Wladimir E. Banda-Barragán**

Universidad Yachay Tech

# **Algunas preguntas que responderemos en esta clase:**

1. ¿Qué es una onda de choque?
2. ¿Cómo se forman las ondas de choque?
3. ¿Por qué las estudiamos en astrofísica?
4. ¿Con qué herramientas contamos para su estudio?

# El método científico...

Observamos un fenómeno



Modelamos teóricamente



Comparamos

Predecimos con modelos teóricos



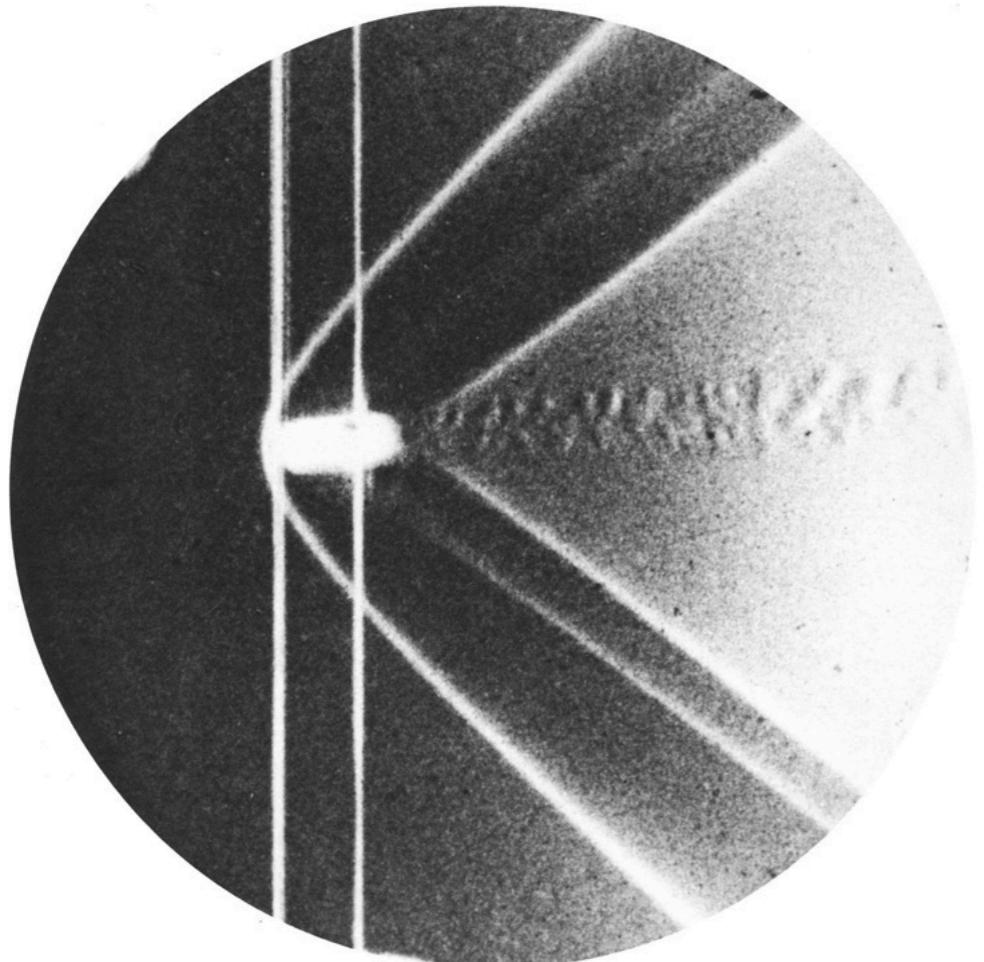
Buscamos experimentando/observando



Comparamos

# Algunos ejemplos cercanos...

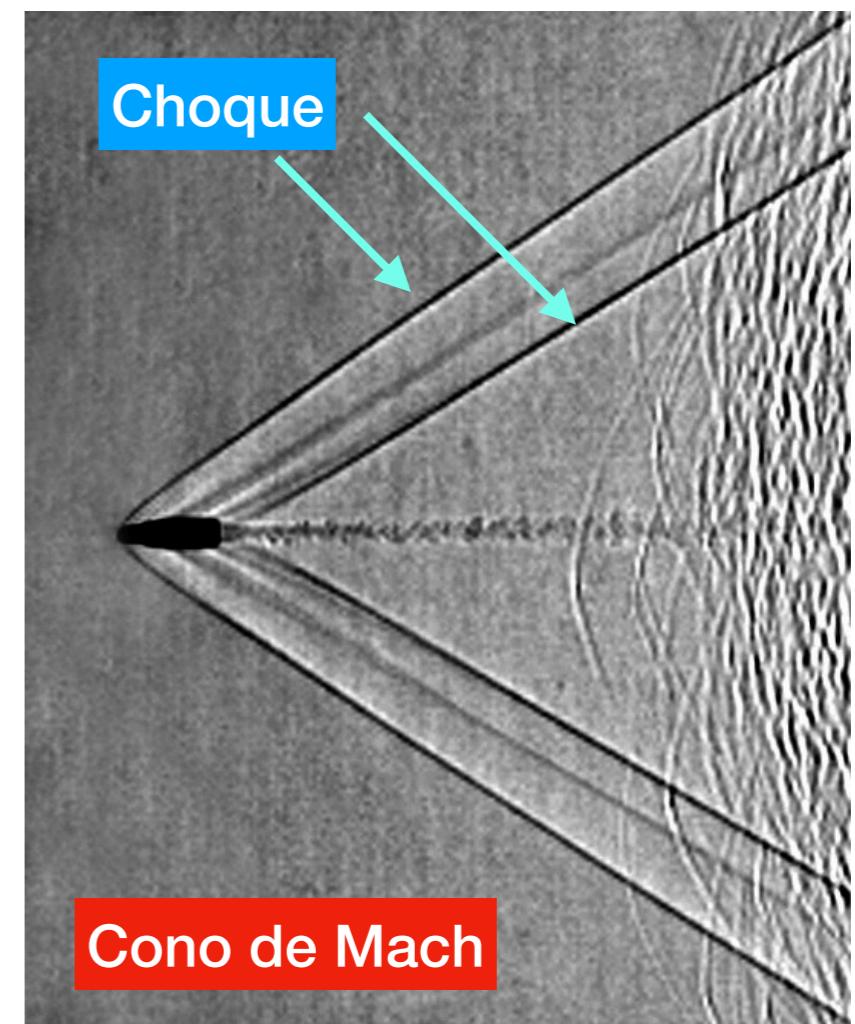
## Objetos balísticos



Fotografía de Schlieren (E. Mach & P. Salcher, 1887)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Shock\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Shock_wave)

En los diagramas Schlieren se observan distorsiones en el gas circundante.



# Algunos ejemplos cercanos...

**Aeronaves**

Se observan conos de vapor.



Fuente: Youtube

<https://www.youtube.com/watch?v=k4IzBlezhB4>

# **Algunos ejemplos cercanos...**

## **Cohetes espaciales**



**Acompañado por  
truenos sónicos.**

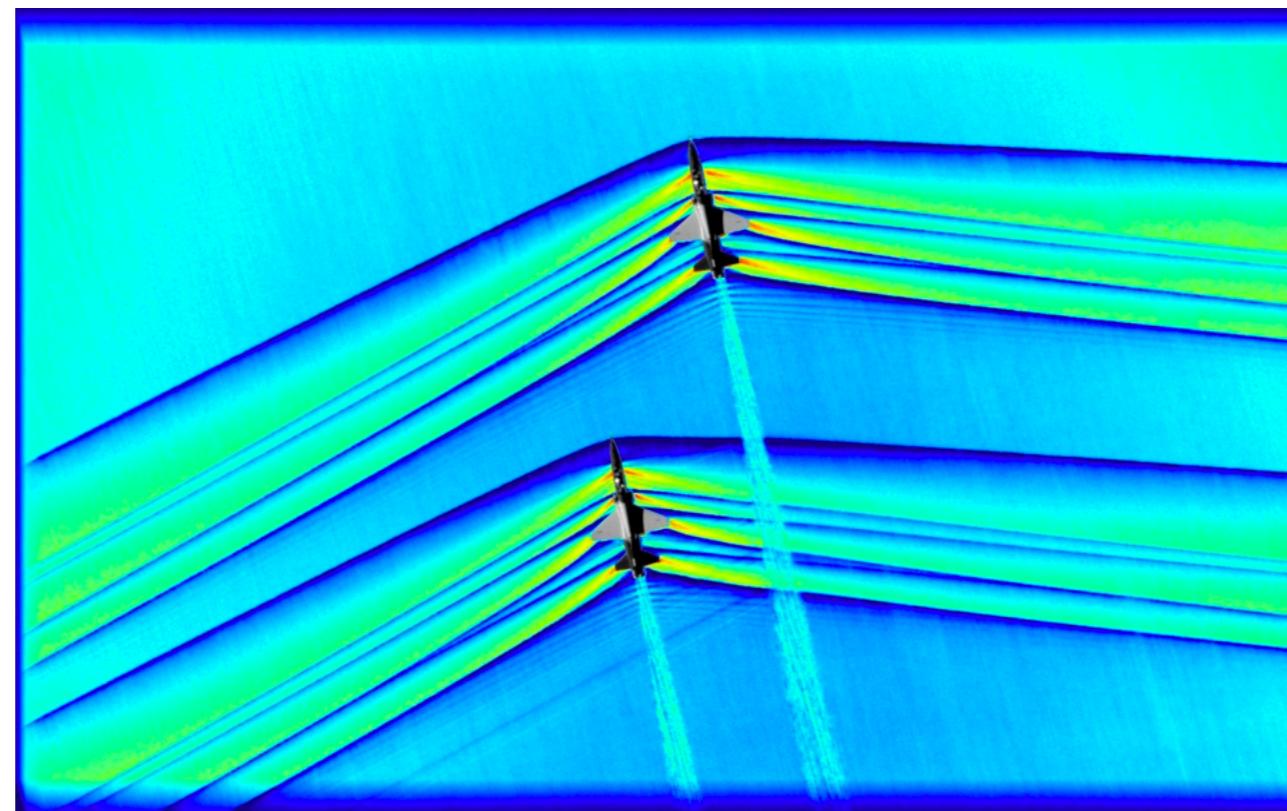
**¡Son sonidos  
fuertes!**

Fuente: Youtube

<https://www.youtube.com/watch?v=d3tO0xN6TTA>

# ¿Qué tienen un común los ejemplos anteriores?

- Los objetos se mueven rápidamente.
- Existe una velocidad crítica para la formación de choques.
- La velocidad crítica es la velocidad del sonido en el gas.



<https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/supersonic-shockwave-interaction.html>

# ¿Cómo estudiamos la propagación de ondas de choque en astrofísica?

1. Observaciones astronómicas
2. Teoría y simulaciones computacionales
  - Mecánica de fluidos / Física de plasmas.
  - Termodinámica
  - Electromagnetismo
  - Física de altas energías.

**Varios objetos astronómicos se mueven rápidamente y generan ondas de choque...**

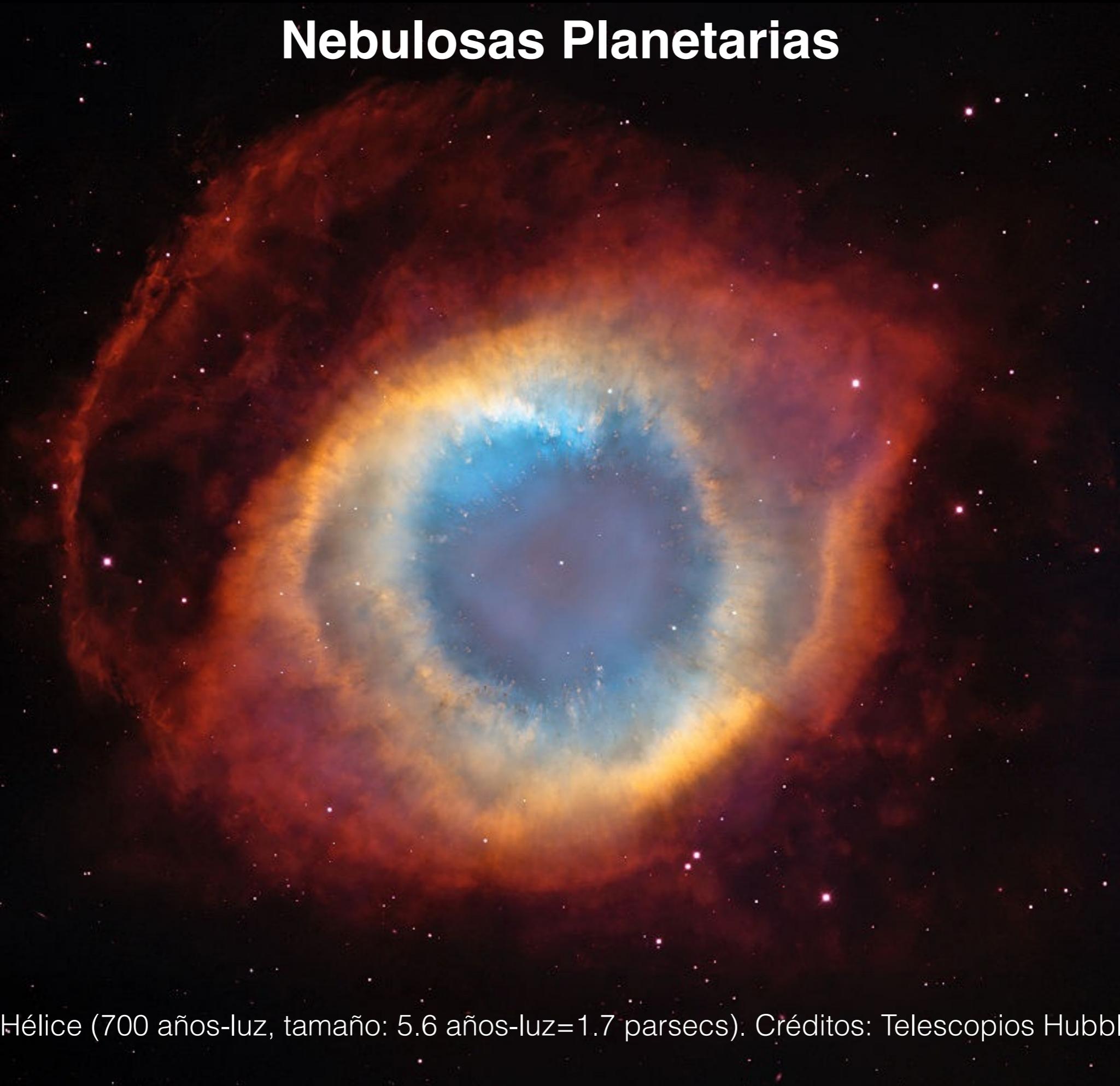
1. Explosiones y vientos estelares
2. Expansión de gas ionizado (conocidas como regiones HII)
3. Turbulencia en el medio interestelar
4. Formación estelar y vientos galácticos
5. Chorros (Jets) - estelares o galácticos.
6. Reliquias de la fusión de cúmulos galácticos.

# Explosiones estelares

Nube interestelar



# Nebulosas Planetarias



Nebulosa Hélice (700 años-luz, tamaño: 5.6 años-luz=1.7 parsecs). Créditos: Telescopios Hubble y CTIO.

# Nebulosas Planetarias

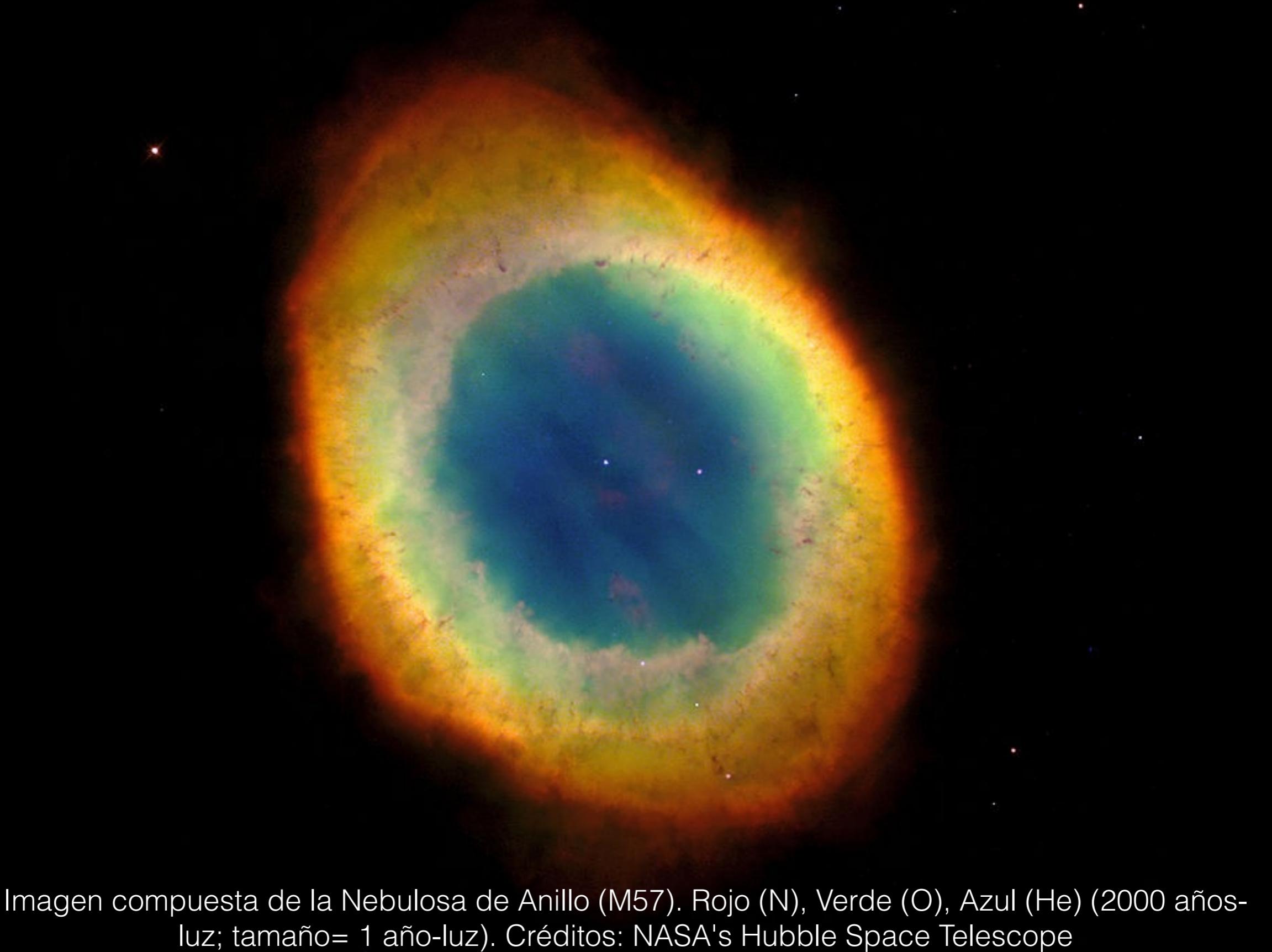


Imagen compuesta de la Nebulosa de Anillo (M57). Rojo (N), Verde (O), Azul (He) (2000 años-luz; tamaño= 1 año-luz). Créditos: NASA's Hubble Space Telescope

# Remanentes de Supernova

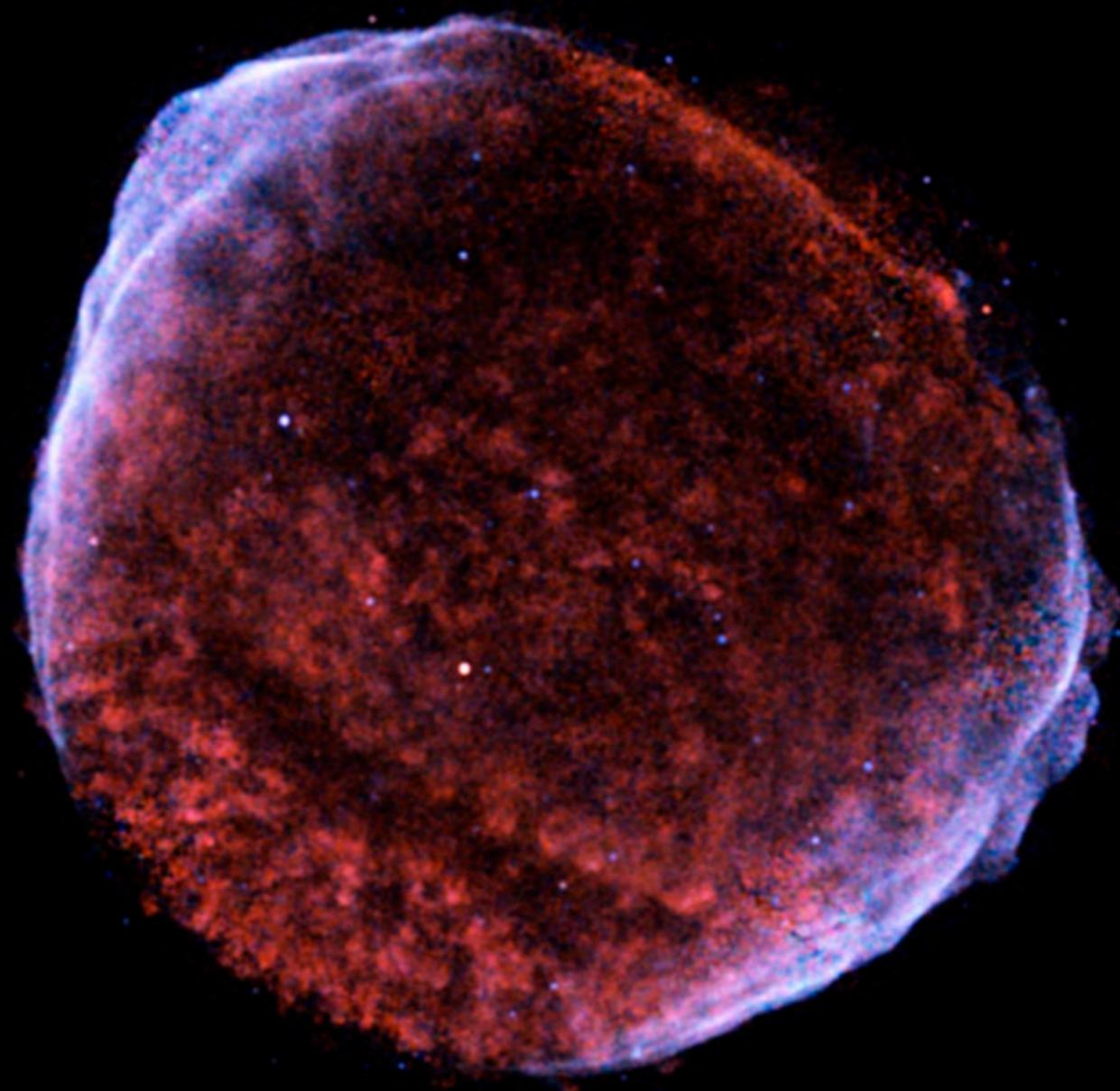
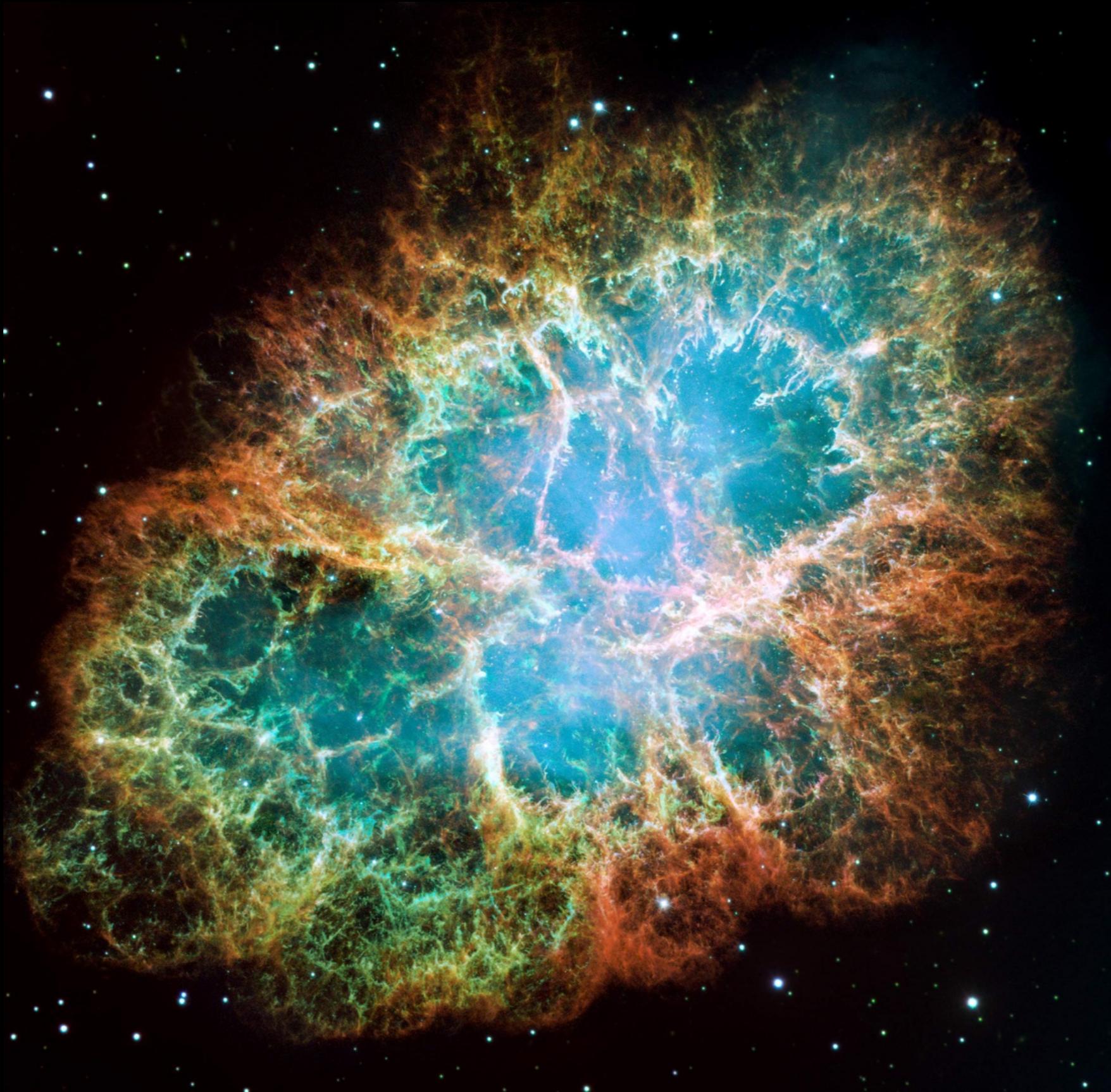


Imagen en rayos X (gas - rojo, electrones - azul) del telescopio Chandra de la SN 1006 (enana blanca).

# Remanentes de Supernova



Nebulosa del Cangrejo (6500 años-luz; tamaño: 6 años-luz). Créditos: Hubble e ISO VLT.

# Turbulence in the ISM

Divergence-free driving (Solenoidal)

Curl-free driving (Compressive)

**Shearing - Gas collisions - Outflows/Winds - Shocks - SN explosions - Gravity**

Rotation

Projected gas density (Mach 17 turbulence) by Federrath 2013

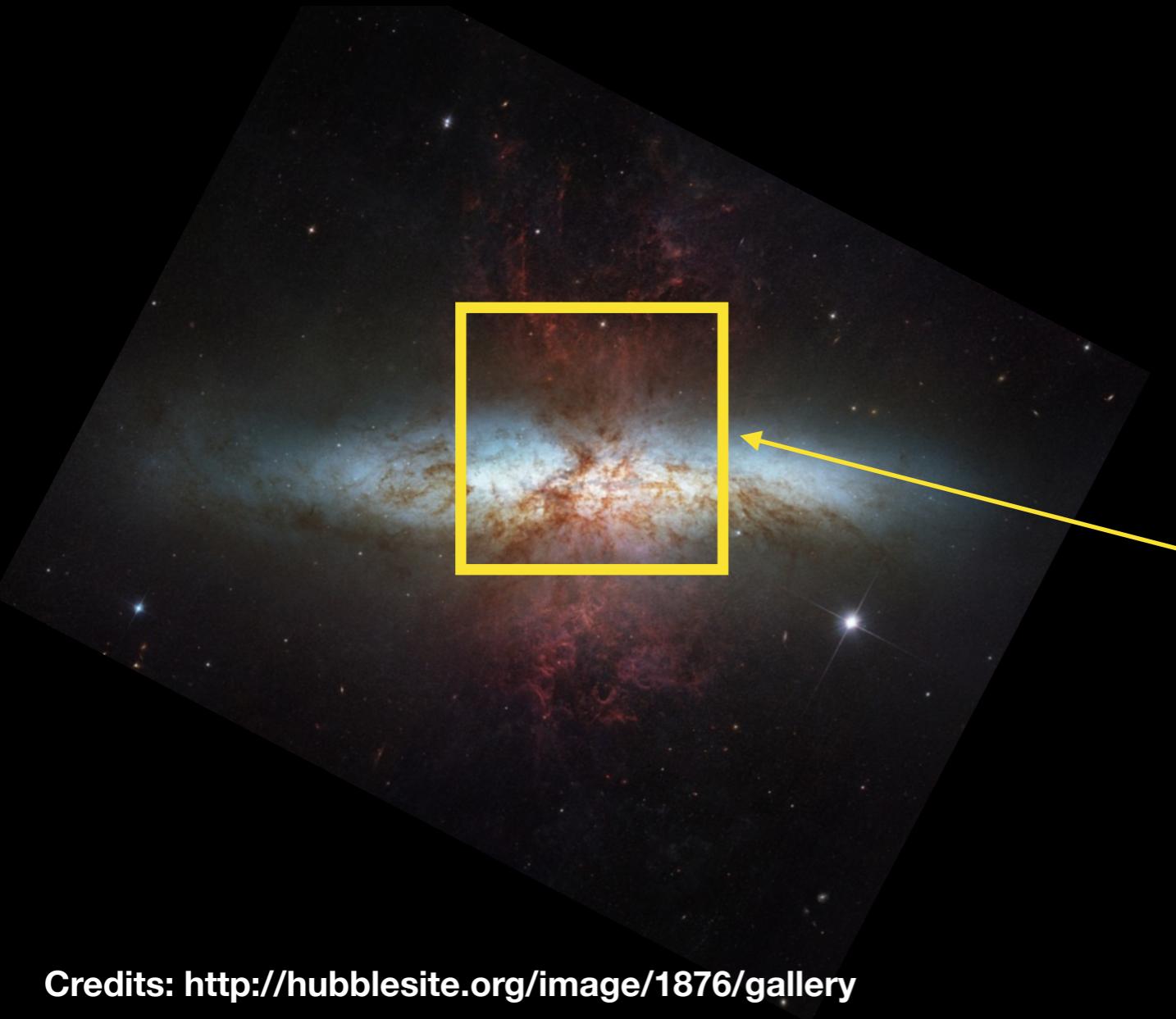
Compression

# Choques en vientos galácticos

ISM = interstellar medium

CGM = circumgalactic medium

The galactic wind in starburst galaxy M82



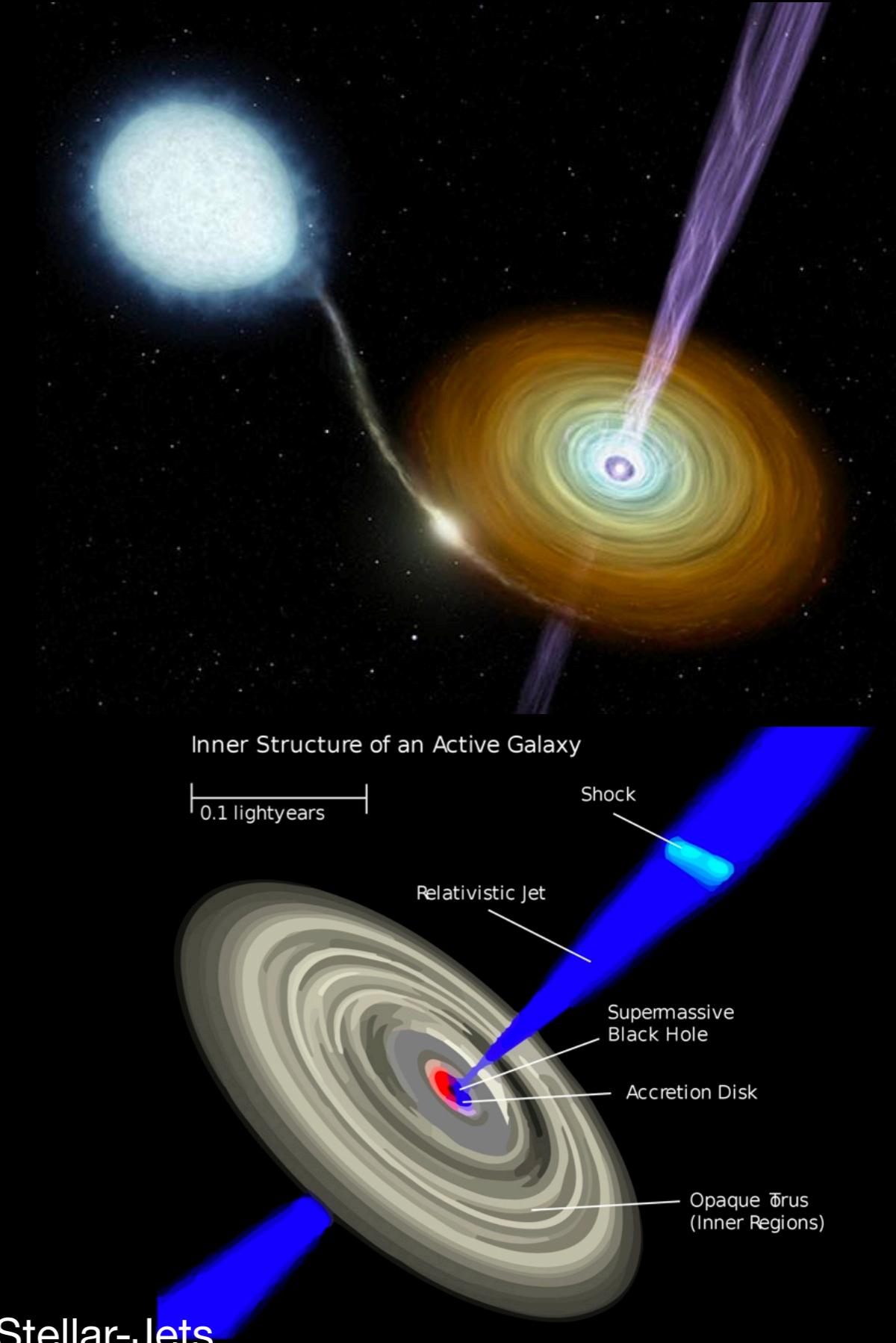
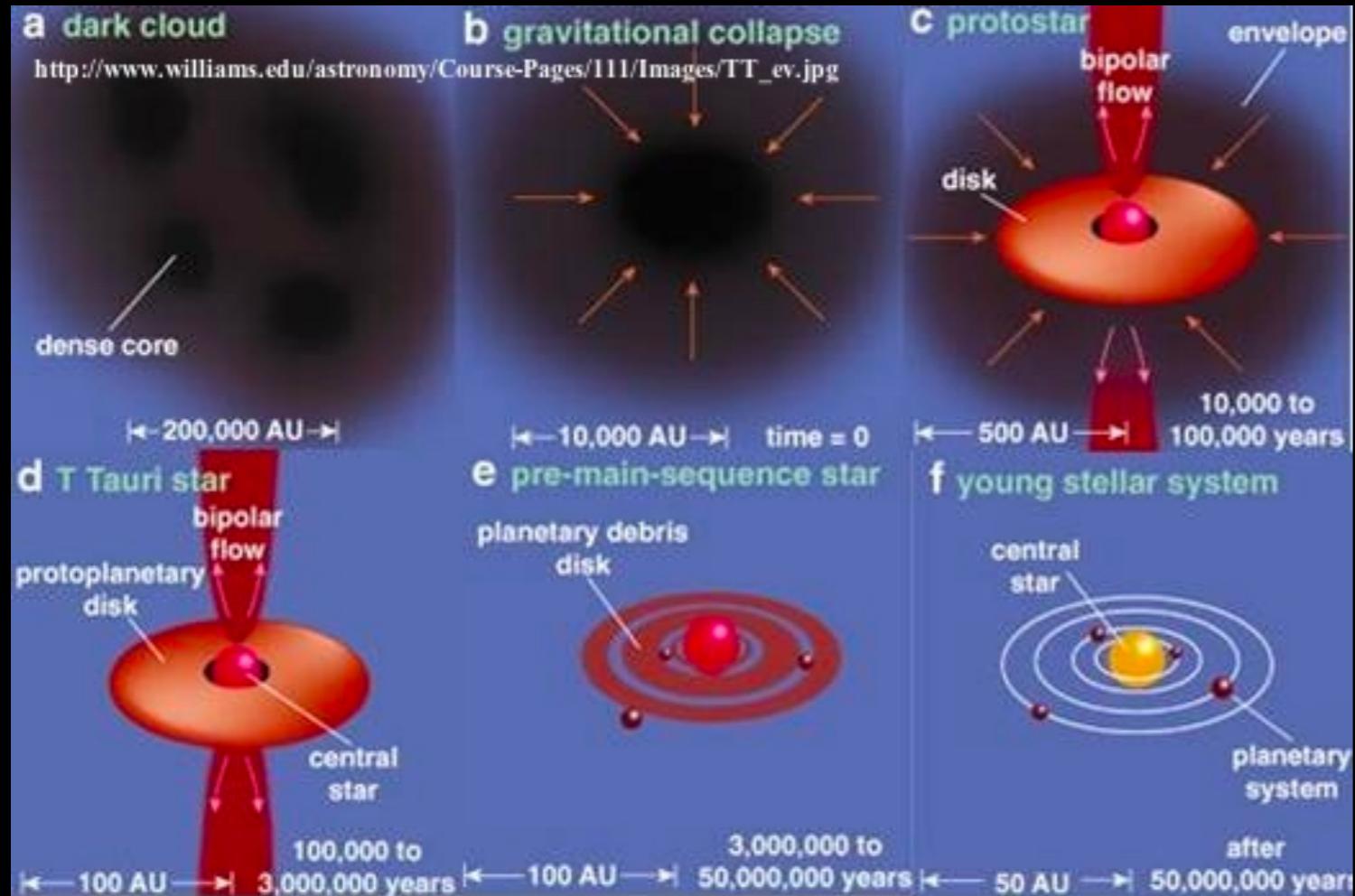
Credits: <http://hubblesite.org/image/1876/gallery>

H-alpha emission

How do stellar-driven winds form?  
Supernovae (SNe) / massive stars  
power galactic winds.

Galactic winds can:  
Exchange mass and energy with CGM.  
Enrich the CGM with metals  
Regulate star formation

# Jets estelares y galácticos



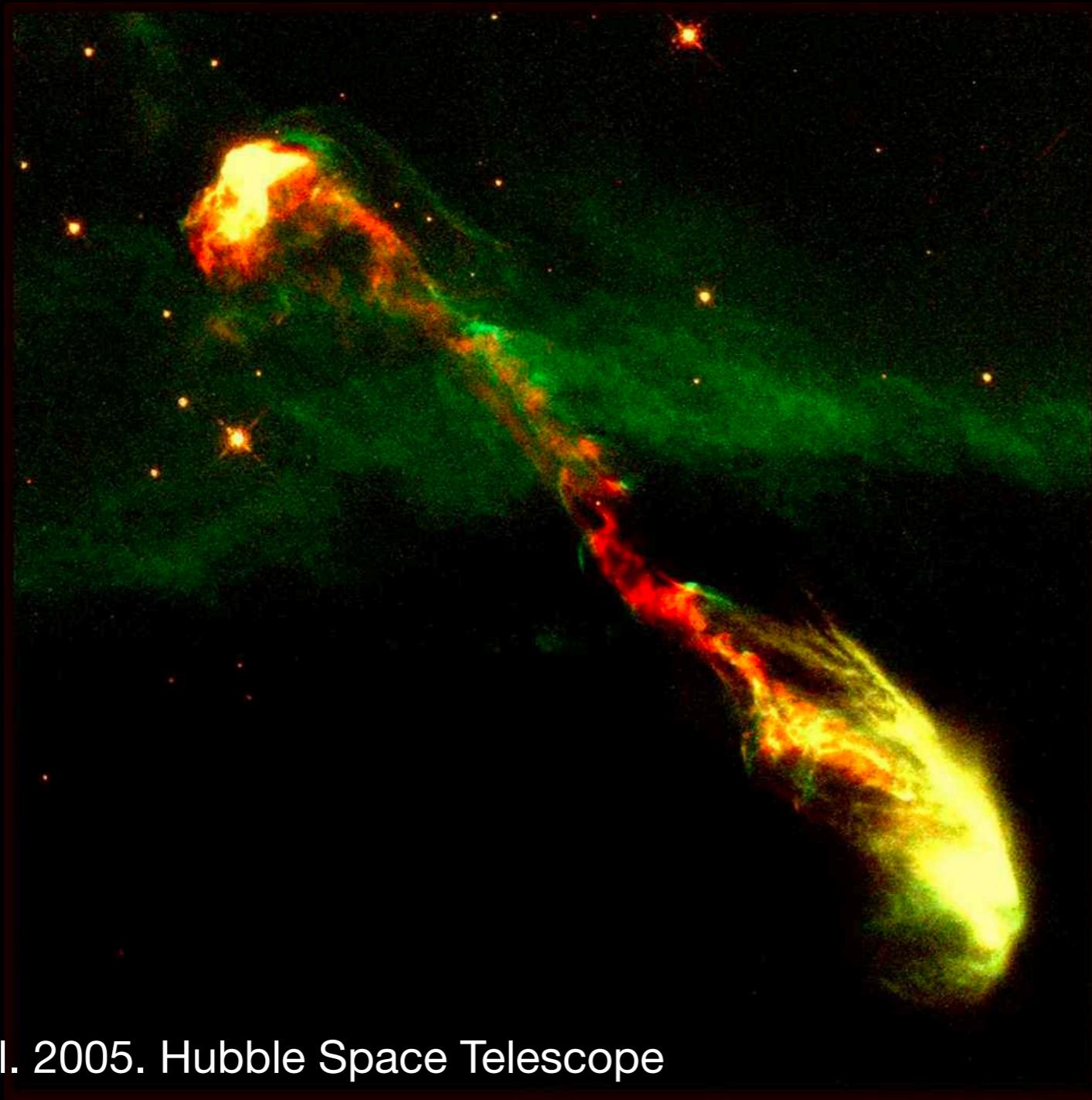
Tomados de:

<https://web.williams.edu/Astronomy/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Astrophysical\\_jet](https://en.wikipedia.org/wiki/Astrophysical_jet)

<http://www.spitzer.caltech.edu/images/2260-sig06-014-Stellar-Jets>

# Jets estelares

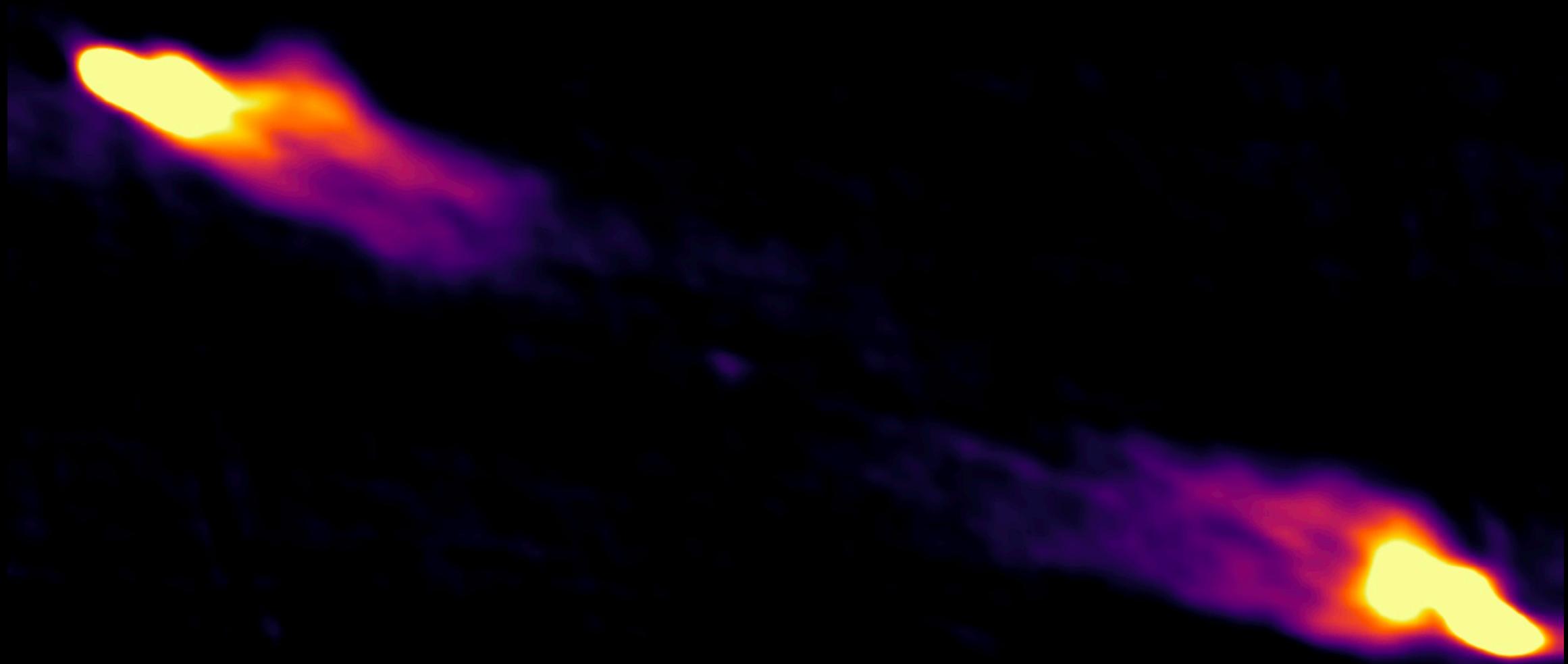


P. Hartigan et al. 2005. Hubble Space Telescope

Visualización 3D/VR: Simulaciones por INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo (Italy):

<https://sketchfab.com/sorlando/collections/universe-in-hands>

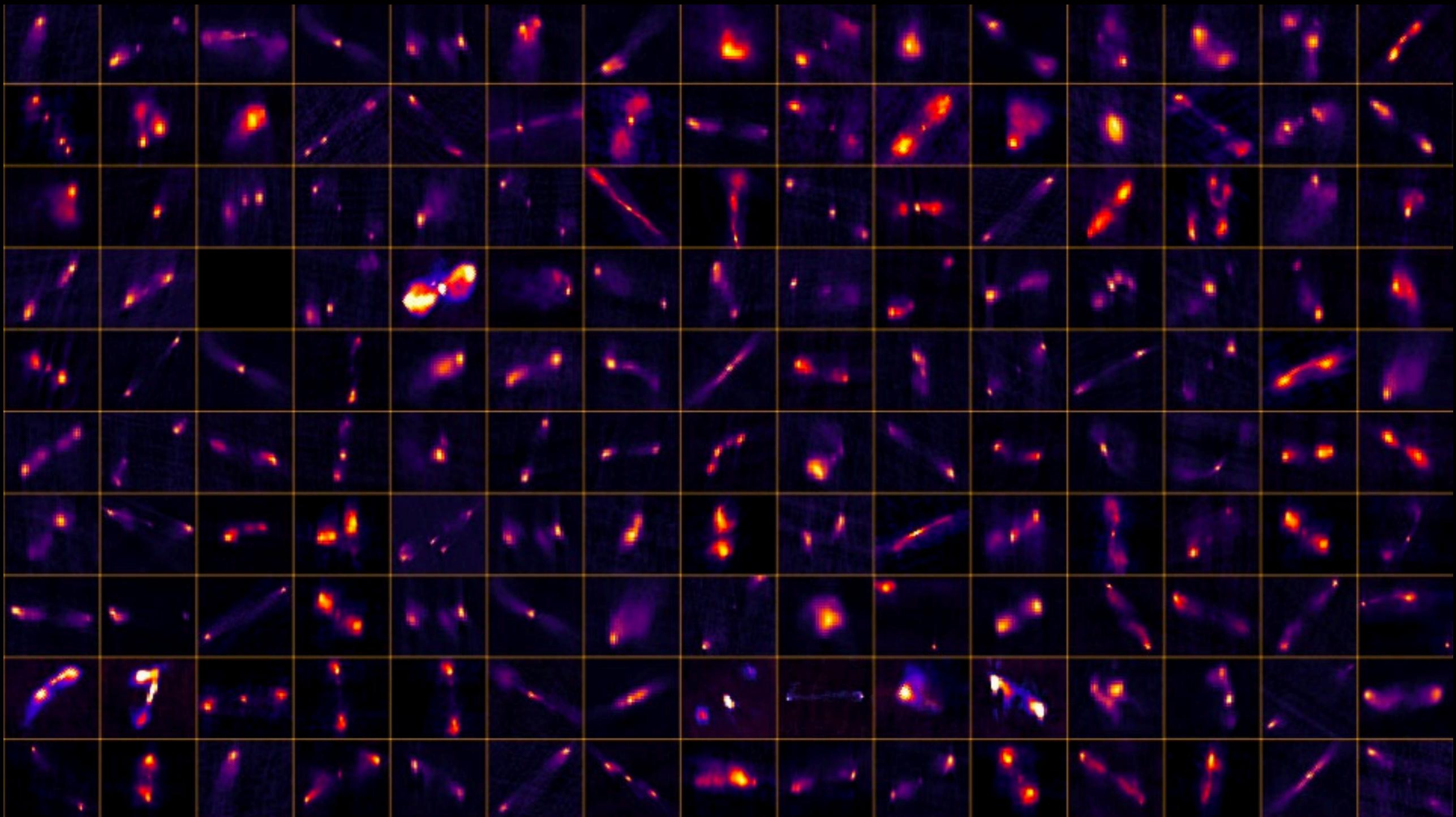
# Jets extragalácticos



Enormes chorros de plasma despegando de un agujero negro supermasivo en el centro de una radio galaxia (punto medio entre los dos chorros). Credit: NRAO/AUI/NSF.

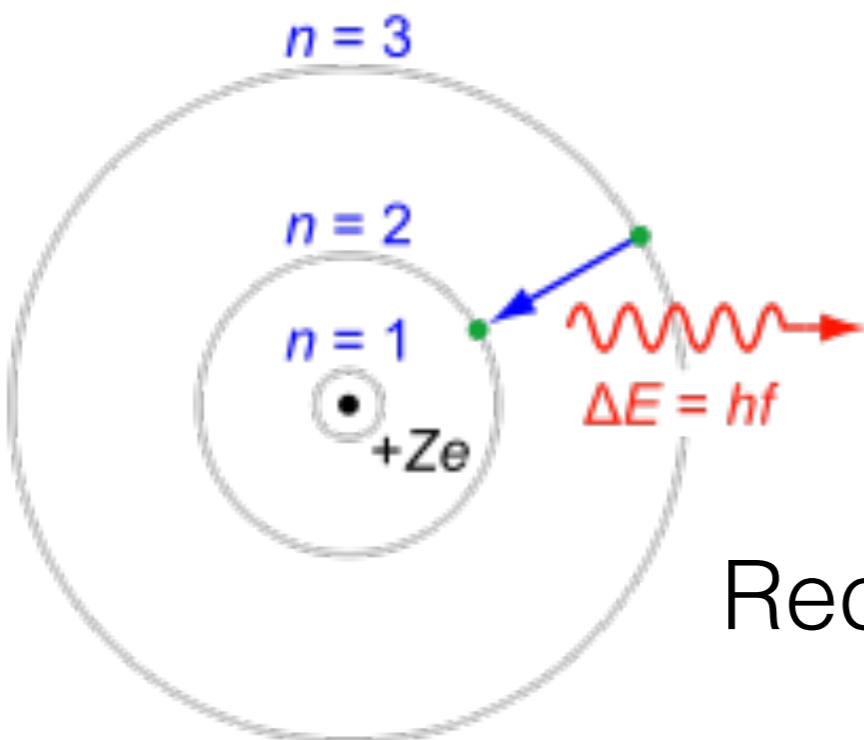
Las ondas de choque pueden acelerar partículas a velocidades relativistas.

# Jets extragalácticos



Tomado de: <https://public.nrao.edu/gallery/quicklook-samples/>

## Gas ionizado

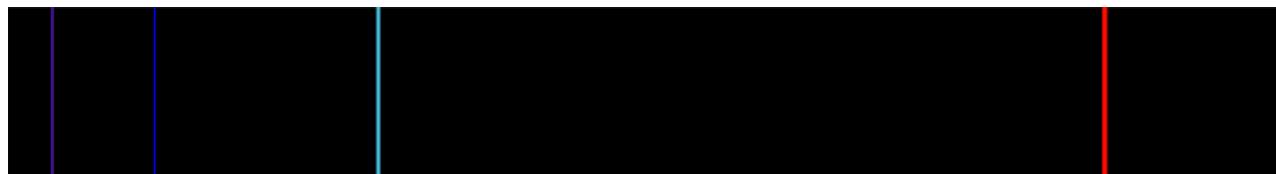


Recombinación



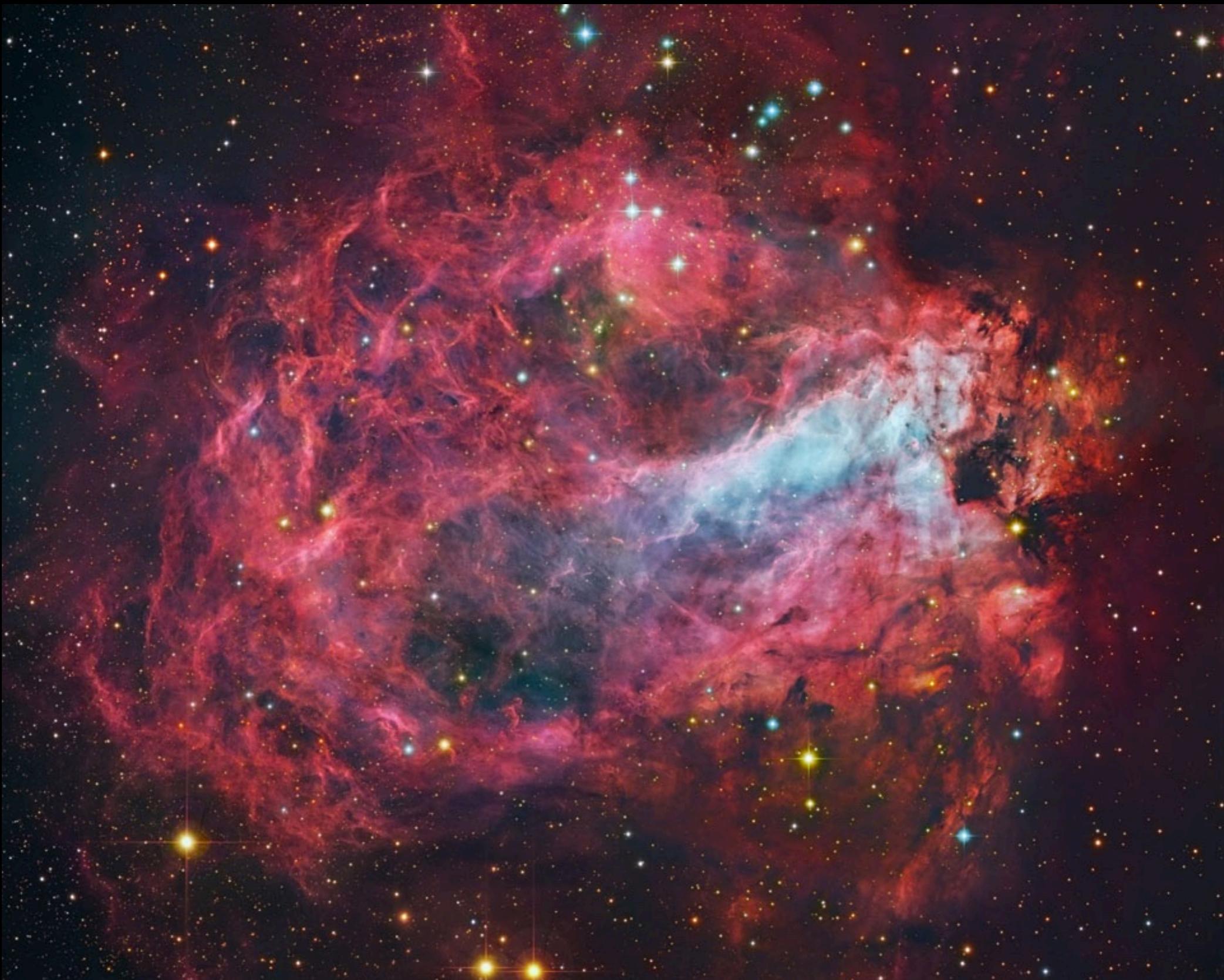
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{4}{B} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{for } n = 3, 4, 5, \dots$$

Ecuación de Balmer



Tomado de: [https://en.wikipedia.org/  
wiki/Balmer\\_series](https://en.wikipedia.org/wiki/Balmer_series)

## Región H II M17



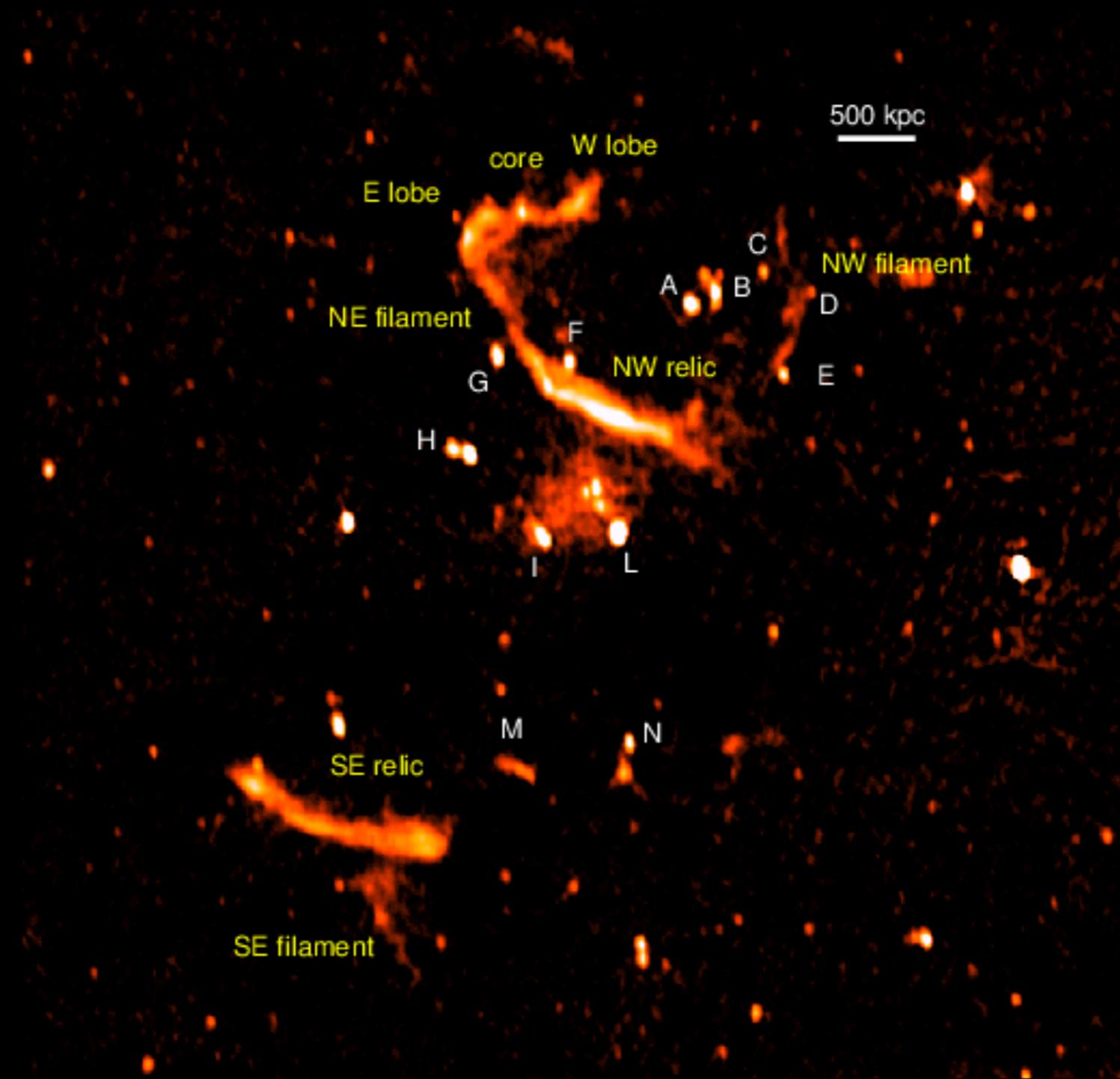
Tomado de: <https://apod.nasa.gov/apod/ap140527.html>

# Región HII Roseta



Tomado de: <https://apod.nasa.gov/apod/ap070214.html>

# Reliquias de radio en cúmulos galácticos



Bonafede et. al. 2014. Emisión en radio de PLCKG287.0 +32.9. Se observan 2 reliquias en radio relacionadas con eventos de fusión entre los grupos de galaxias. Las radio galaxias se indican con letras blancas.

En resumen, llegamos a ecuaciones matriciales:

## Hidrodinámica

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho v] = 0,$$

$$\frac{\partial [\rho v]}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho vv + IP] = 0,$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + P)v] = 0,$$

—

Masa

Momento

Energía

Inducción

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho v] = 0,$$

$$\frac{\partial [\rho v]}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho vv - BB + IP] = 0,$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + P)v - B(v \cdot B)] = 0,$$

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

donde:  $P = P_{\text{th}} + (P_{\text{mag}})$  con  $P_{\text{mag}} = \frac{1}{2}|\mathbf{B}|^2$ .

$E = \rho\epsilon + \frac{1}{2}\rho v^2 + (\frac{1}{2}|\mathbf{B}|^2)$ , con  $\epsilon$  siendo la energía interna.

## Ecuación de Estado

$$P_{\text{th}} = P_{\text{th}}(\rho, \epsilon) = (\gamma - 1)\rho\epsilon$$

## Magneto-hidrodinámica

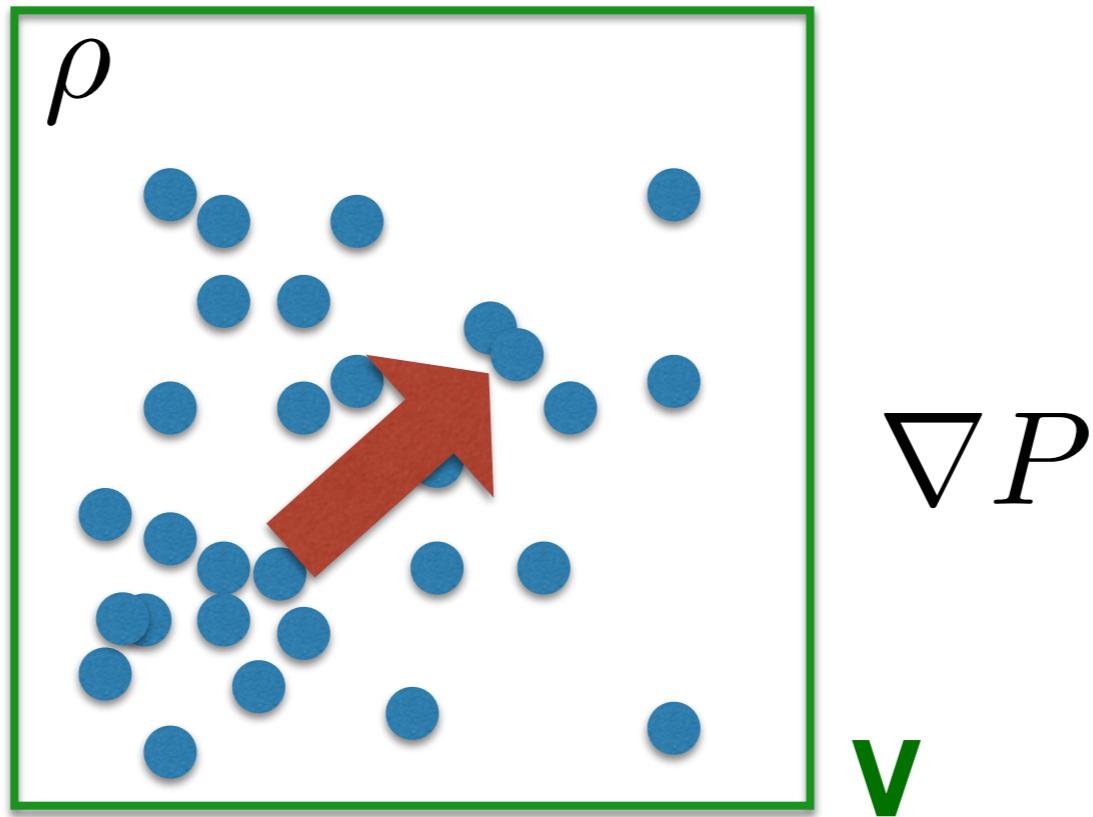
Debemos estudiar las propiedades de gases astrofísicos.  
Encontremos leyes de conservación:



Movimiento de un punto de masa:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}$$

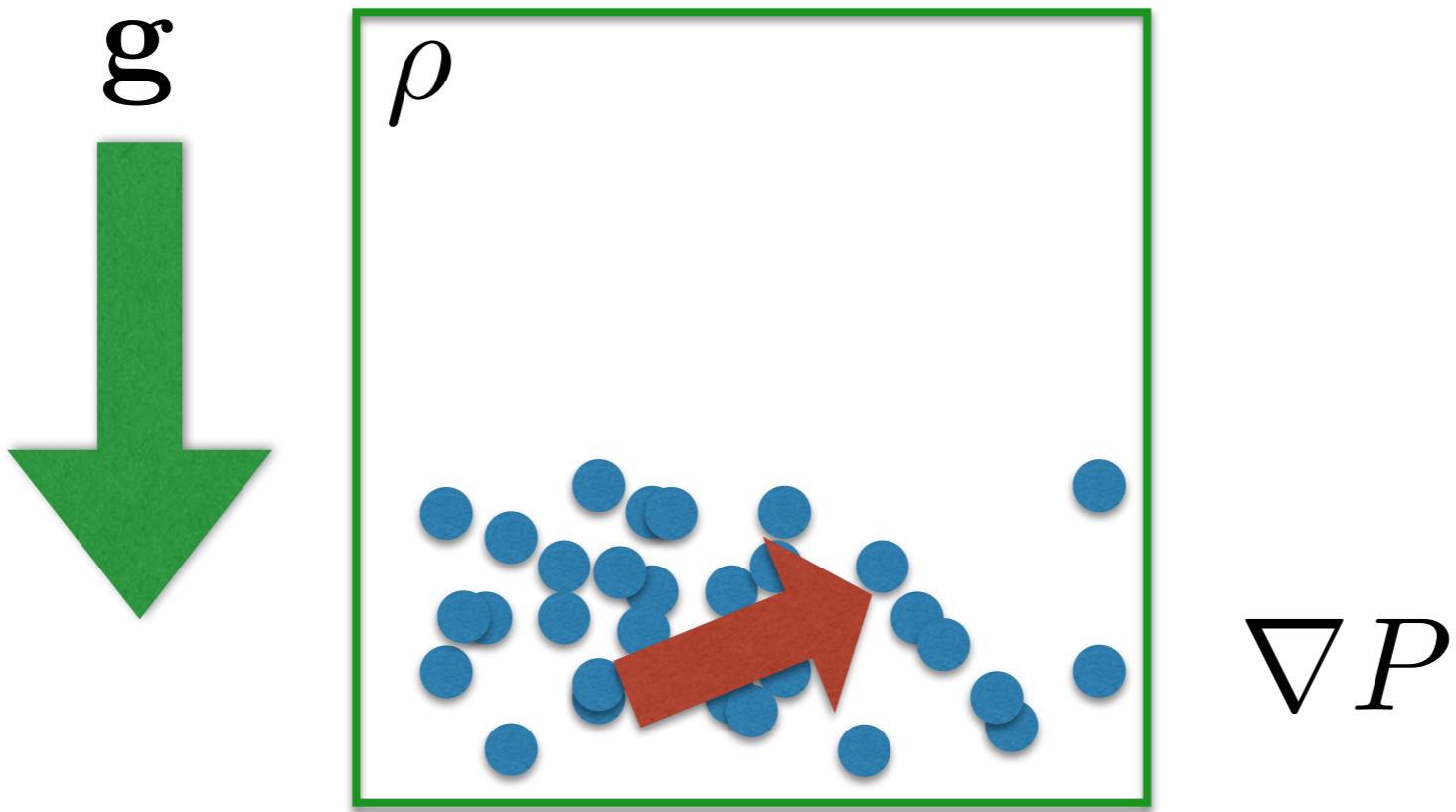
Para un medio continuo (e.g. un fluido):  
Definimos la densidad de masa,  $\rho$



$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_v$$

$$\mathbf{F}_v = -\nabla P$$

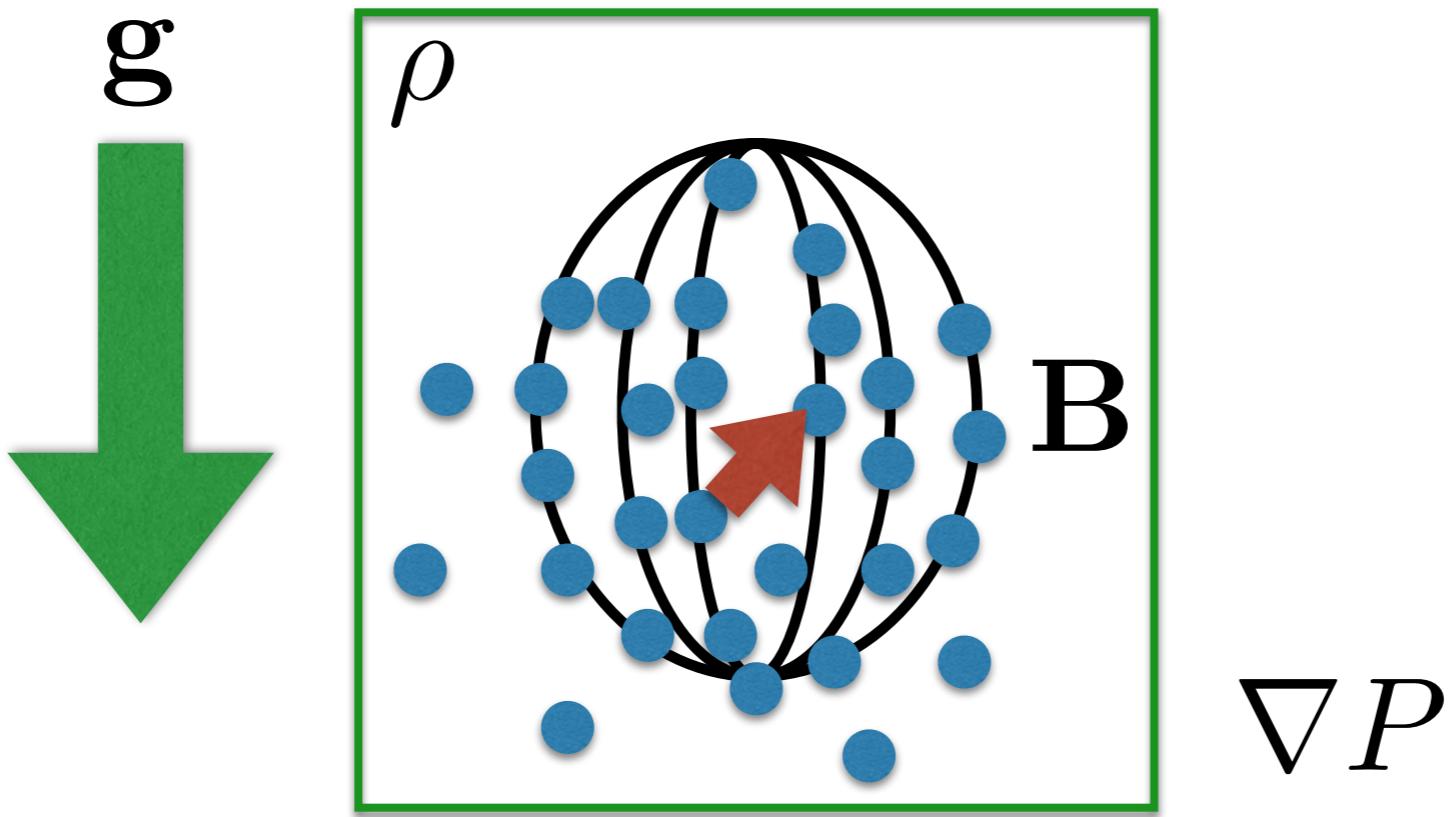
Para un medio continuo (e.g. un fluido):



$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_v$$

$$\mathbf{F}_v = -\nabla P + \rho \mathbf{g}$$

Para un medio continuo (e.g. un fluido):



$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_v$$

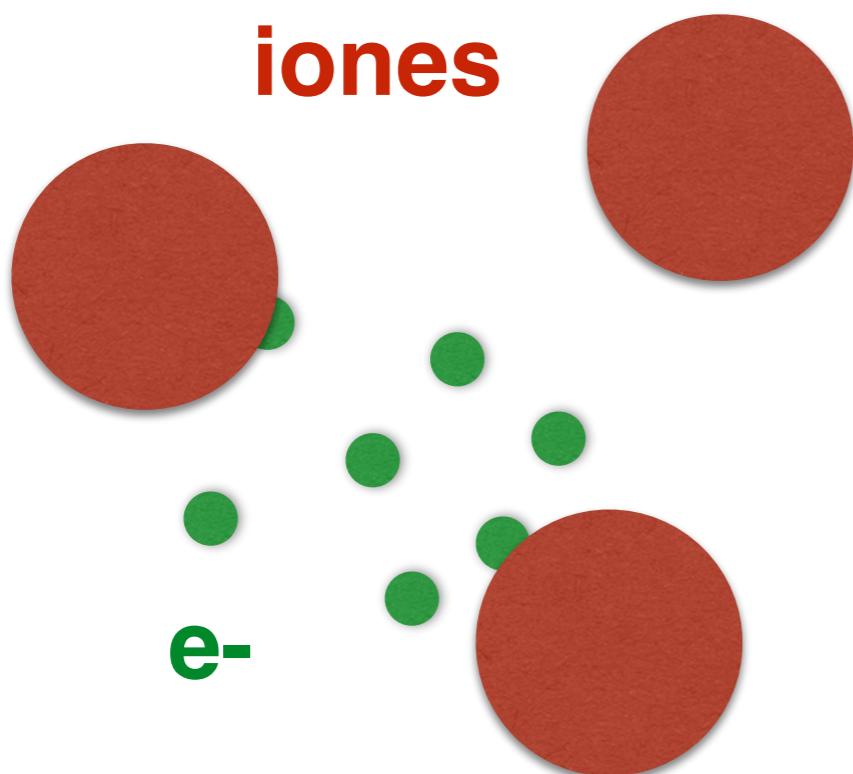
$$\mathbf{F}_v = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

Entonces... Conservación de Momentum:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

**IMPORTANTE:**

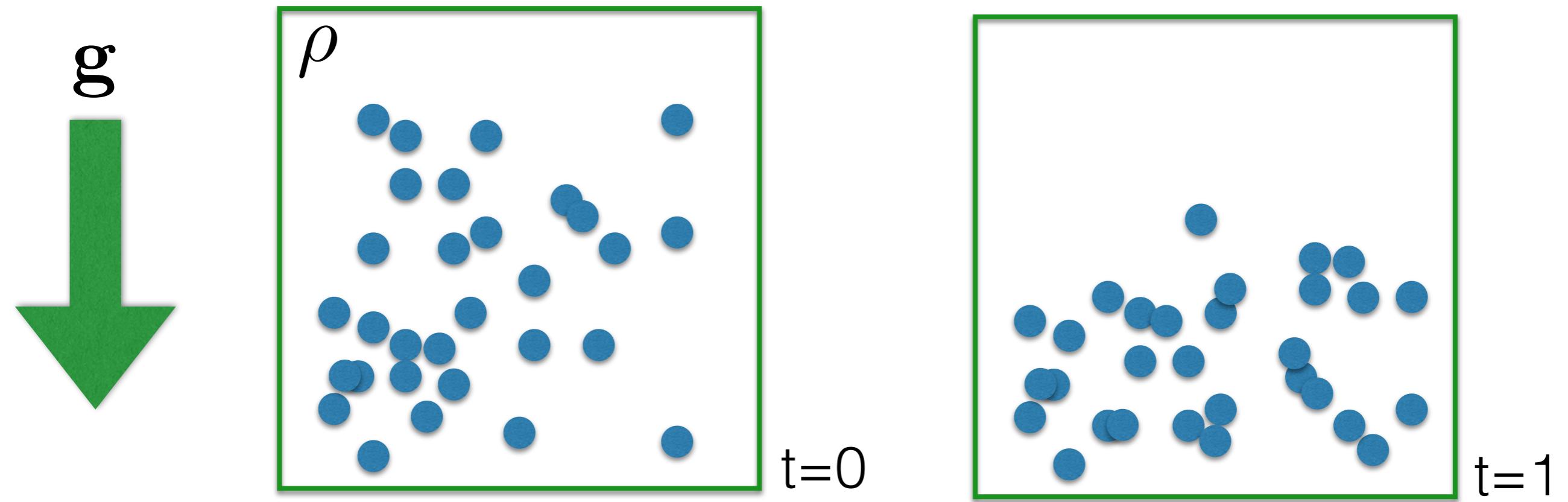
**En MHD, los iones y electrones son tratados como un solo fluido.**



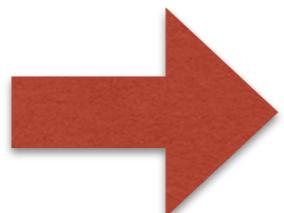
**Electrones llevan la corriente  
y “perciben” B.**

**Iones llevan la inercia.**

Tenemos que cerrar el sistema de ecuaciones...



Conservación  
de Masa



Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho v)$$

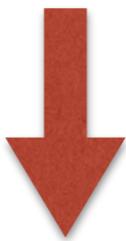
## Fuerza de Lorentz

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B} = (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$



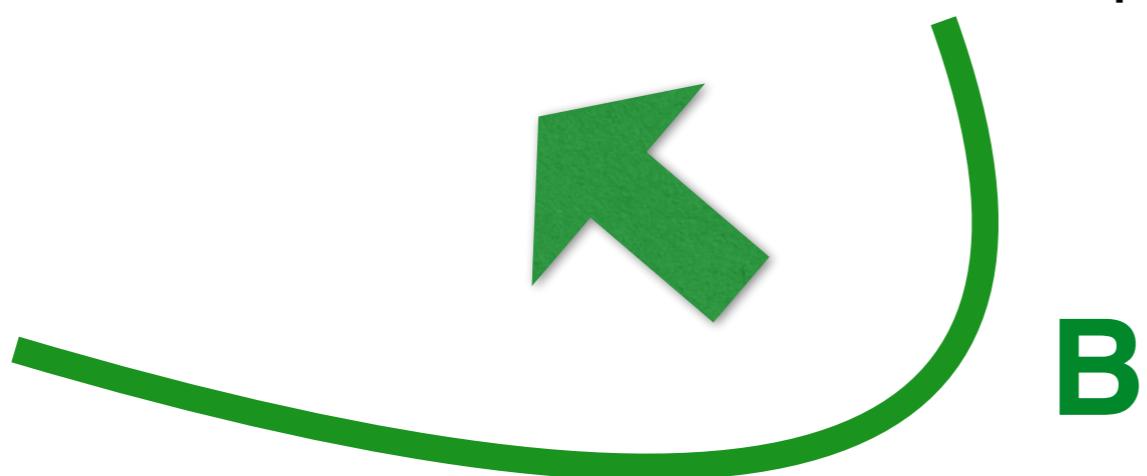
Ley de Ampere para bajas frecuencias.

$$\mathbf{F}_L = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} - \nabla \left( \frac{1}{2} \mathbf{B}^2 \right)$$



Tensión magnética

Presión magnética



**Línea de campo actúa  
como un elástico.**

Ecuación de Inducción de Faraday:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

Restricción de Gauss:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

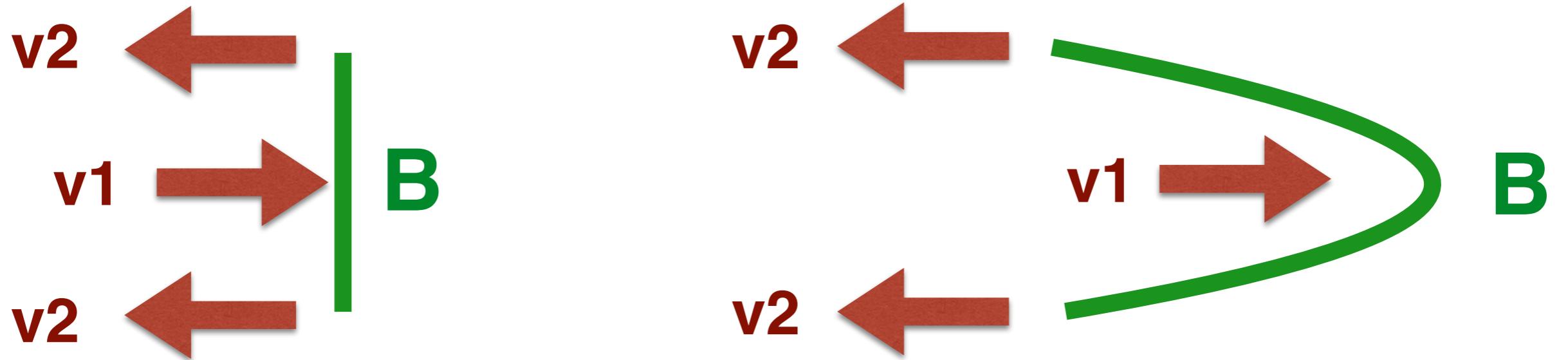
Ley de Ohm

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j} \quad \rightarrow \quad \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$$

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

MHD ideal implica que las líneas de campo magnético están “congeladas” en el plasma (Teorema de Alfvén).

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



i.e. las líneas de campo se mueven con el plasma.

# MHD Ideal

Alfvén 1942 (Navier-Stokes + Maxwell)

**B** induce corrientes que crean fuerzas.  
Estás fuerzas cambian **B**.

**Aplicable a:**

Fluidos/plasmas con alta conductividad y alta frecuencia de colisiones.

¿Es esto válido?

**Sí, en gases astrofísicos.**

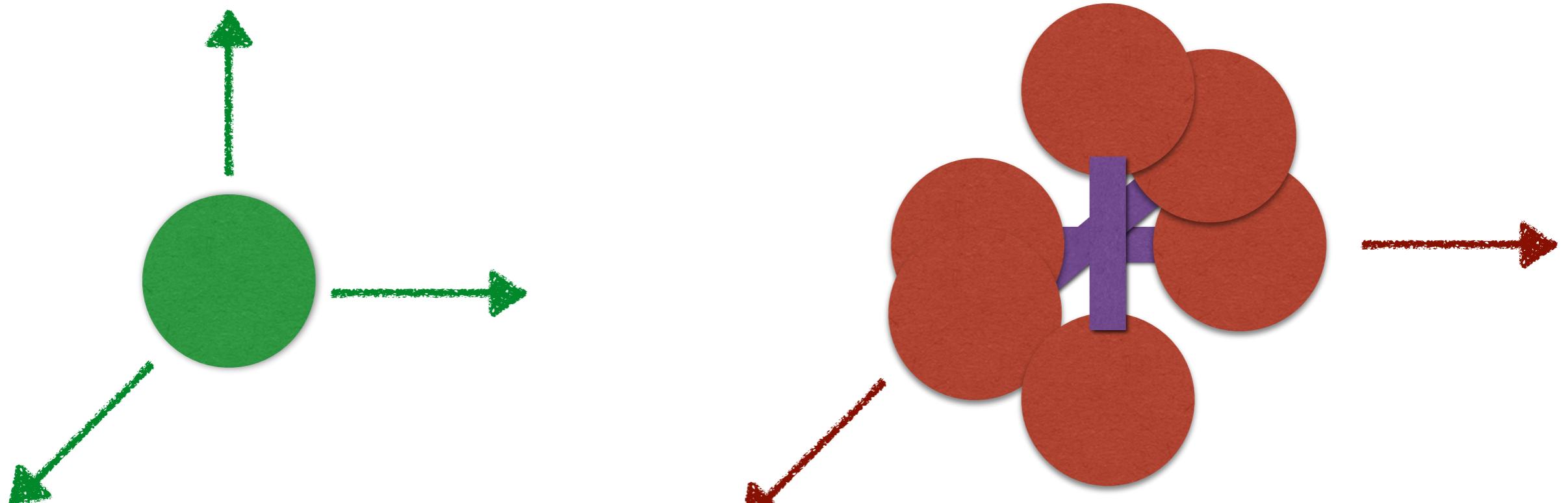
**MHD es una primera aproximación en otros casos.**

# Termodinámica del gas

Índice politrópico:

$$\gamma = 1 + \frac{2}{f}$$

$f$  = # de grados de libertad.



Gas monoatómico

$$f = 3$$

Gas biatómico

$$f = 5$$

$$\gamma = \frac{5}{3}$$

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

Ecuación de Estado (Gas Ideal):

$$P = nk_B T$$

Densidad de energía interna:

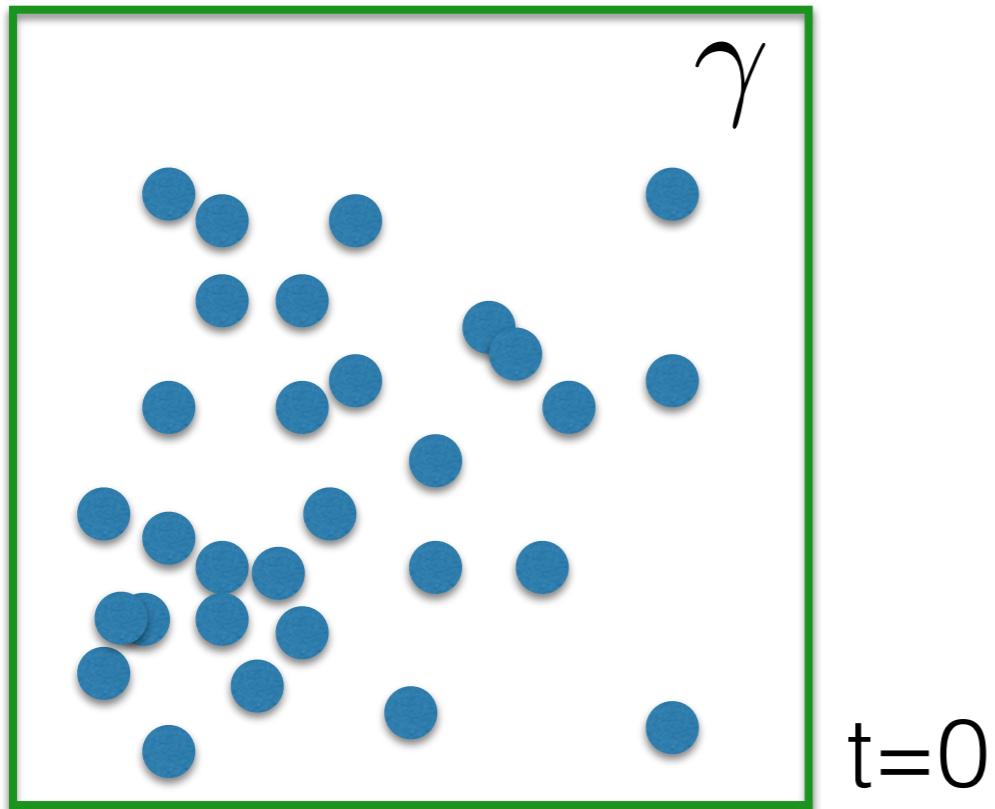
$$U = \frac{f}{2} nk_B T = \frac{nk_B T}{\gamma - 1} = \frac{P}{\gamma - 1}$$

Densidad específica de energía interna

$$\epsilon = \frac{U}{\rho} = \frac{P}{\rho(\gamma - 1)} \rightarrow$$

$$P = (\gamma - 1)\rho\epsilon$$

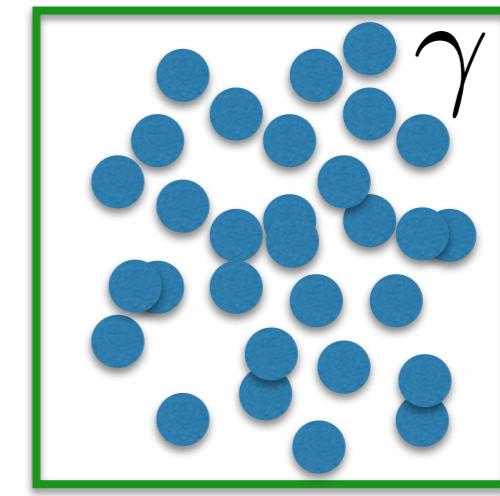
Tenemos que cerrar el sistema de ecuaciones...



$$V_1 < V_0$$

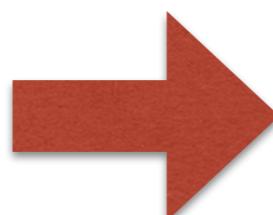
$$\rho_1 > \rho_0$$

$$P_1 > P_0$$



$$PV^\gamma = \text{constante}$$

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{constante}$$

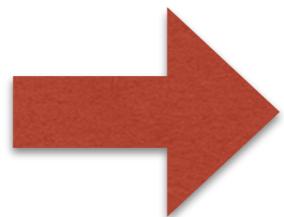


$$\frac{d}{dt} \left( \frac{P}{\rho^\gamma} \right) = 0$$

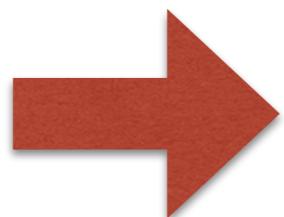
Derivada temporal convectiva.

Entonces....

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{P}{\rho^\gamma} \right) = 0$$



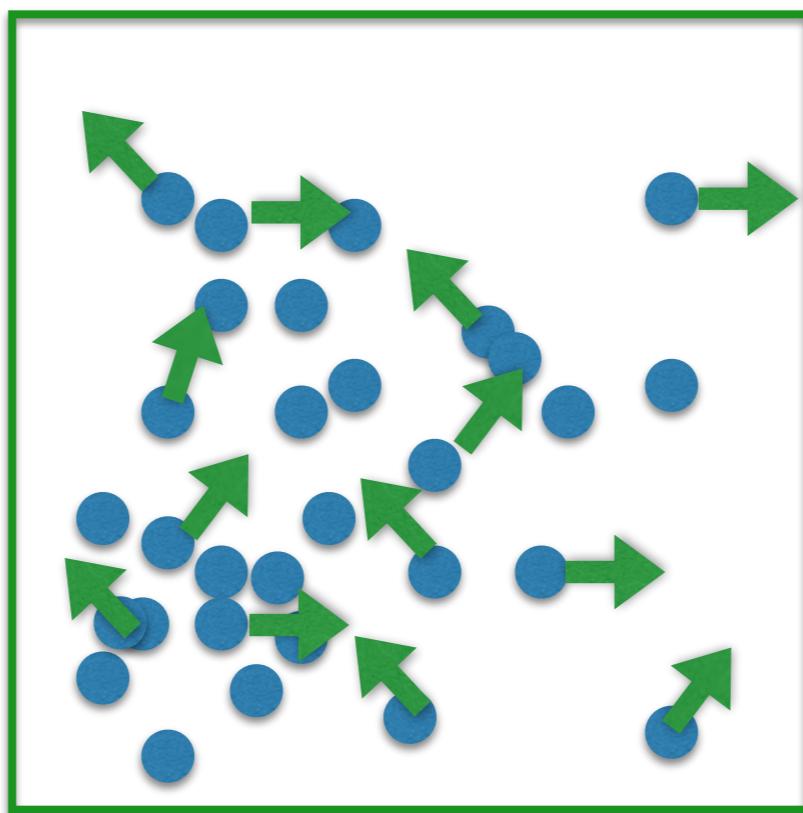
$$\frac{dP}{dt} = -\gamma P \nabla \cdot \mathbf{v}$$



$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{P}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{v}$$

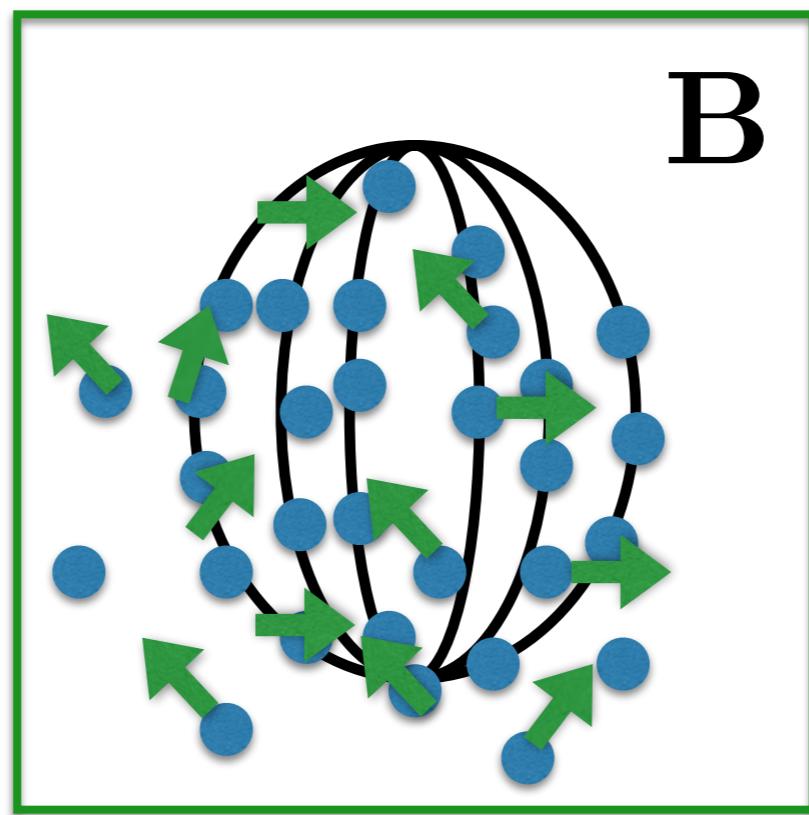
Conservación de la energía.

# Densidad de Energía, E:



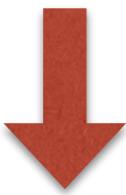
$$E = \rho\epsilon + \frac{1}{2}\rho v^2$$

# Densidad de Energía, E:



$$E = \rho\epsilon + \frac{1}{2}\rho v^2 + \frac{1}{2}B^2$$

$$E = \rho\epsilon + \frac{1}{2}\rho v^2 + \frac{1}{2}B^2$$

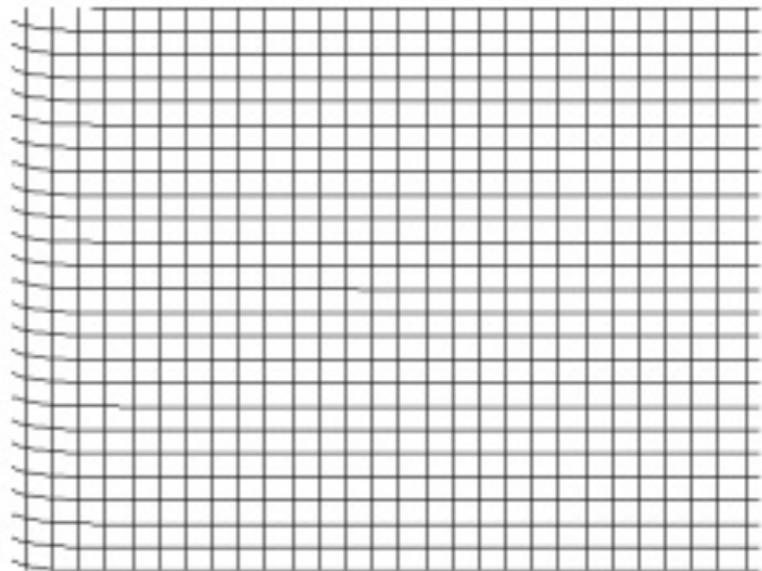
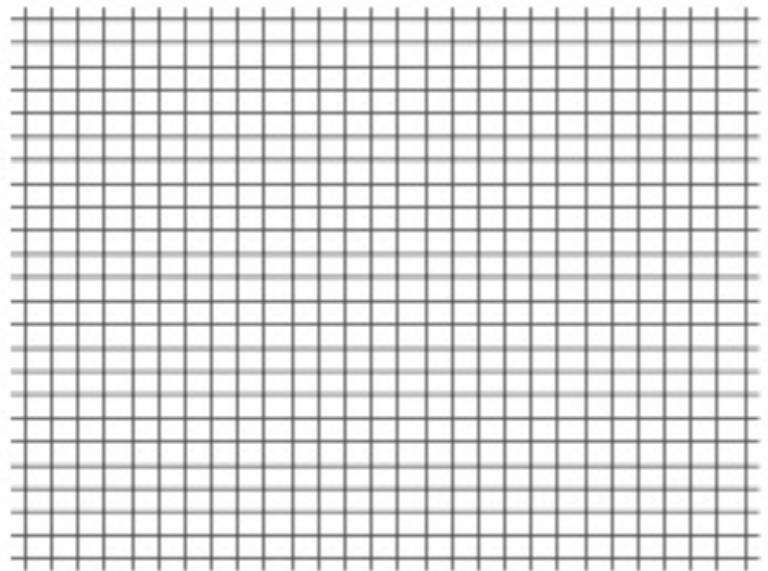


$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{P}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{v}$$

Conservación de la energía:

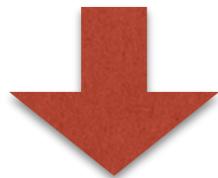
$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ (E + P + \frac{1}{2}B^2)\mathbf{v} - \mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \right] = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g}$$

# Ondas

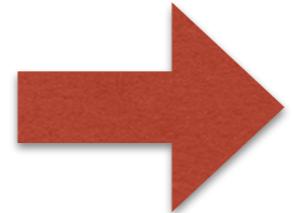


Dang C., & Chan, N  
Tomado de: <https://commons.wikimedia.org>

Longitudinal



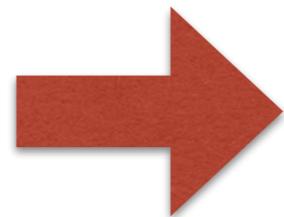
e.g. El sonido



$$w^2 = k^2 c_s^2$$

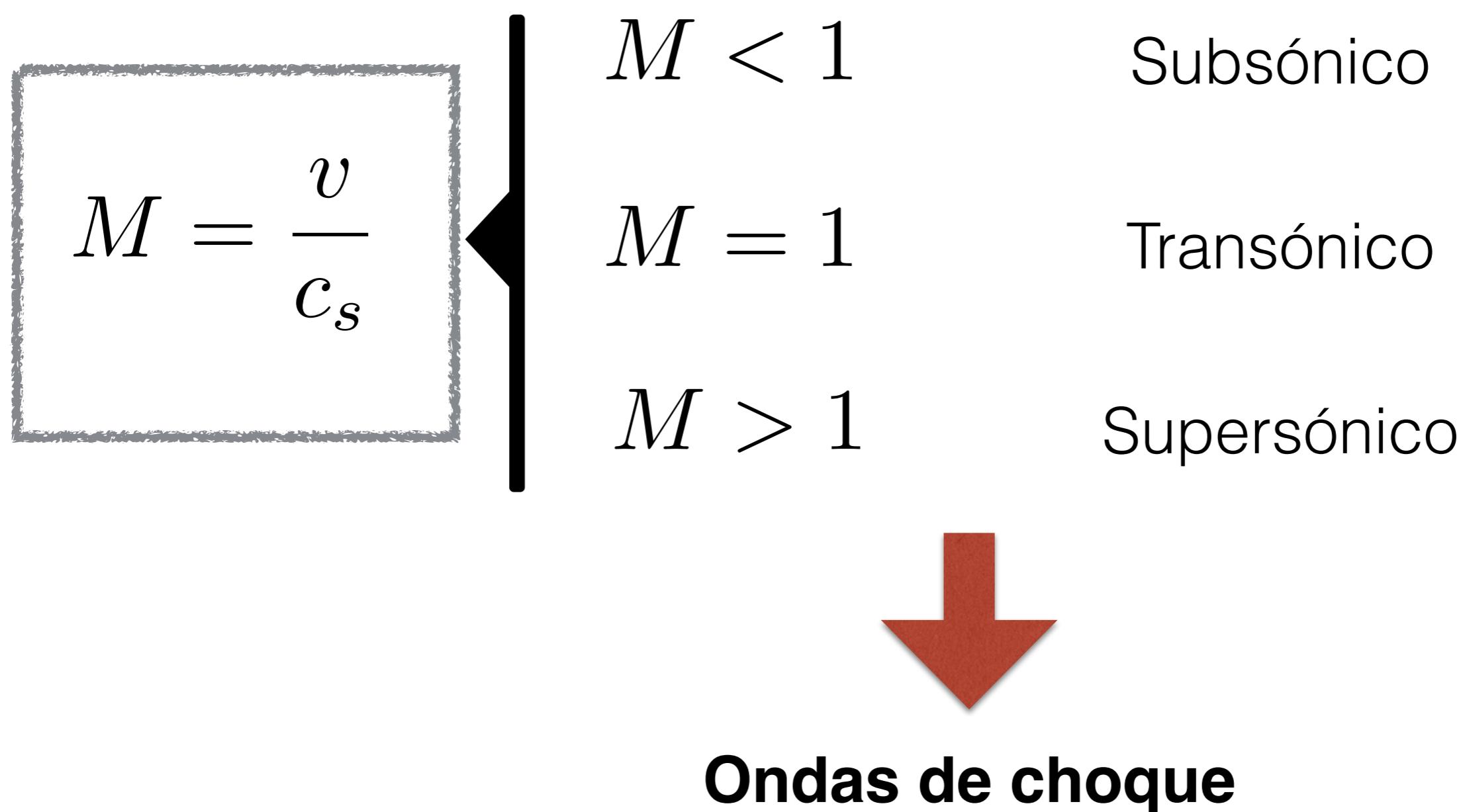
Velocidad del sonido en el gas:

$$c_s^2 = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S$$



$$c_s = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$$

# Número de Mach



Discontinuidad en densidad,  
presión, y temperatura.

# Ondas de choque

Se percibe el trueno sónico y el choque tipo arco.

# Teoría de choques

Recordamos las ecuaciones MHD:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

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

Donde:

$$\mathbf{T} = \rho \mathbf{V} \mathbf{V} + \left( p + \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0} \right) \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{\mu_0}$$

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

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

$$u = \frac{1}{2} \rho V^2 + \frac{p}{\Gamma - 1} + \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\mathbf{u} = \left( \frac{1}{2} \rho V^2 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} p \right) \mathbf{V} + \frac{\mathbf{B} \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})}{\mu_0}$$

Material tomado del curso de Richard Fitzpatrick:

<https://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/lectures1/node79.html>

# Teoría de choques

Plano de referencia de un choque plano:  $\partial/\partial t = \partial/\partial y = \partial/\partial z = 0$

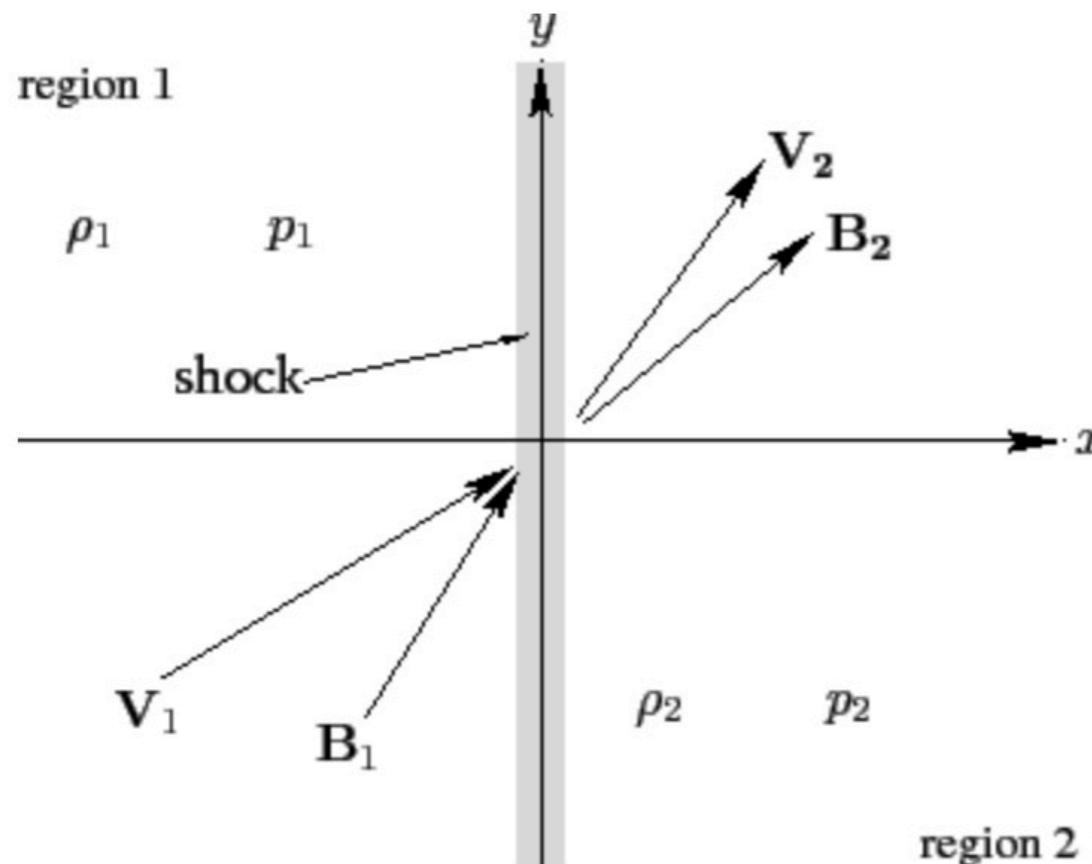


Figure 28: A planar shock.

Pre-choque  
(1)

Post-choque  
(2)

$$\frac{dB_x}{dx} = 0$$

$$\frac{d}{dx}(V_x B_y - V_y B_x) = 0$$

$$\frac{d(\rho V_x)}{dx} = 0$$

$$\frac{dT_{xx}}{dx} = 0$$

$$\frac{dT_{xy}}{dx} = 0$$

$$\frac{du_x}{dx} = 0$$

# Condiciones Rankine-Hugoniot para choques MHD

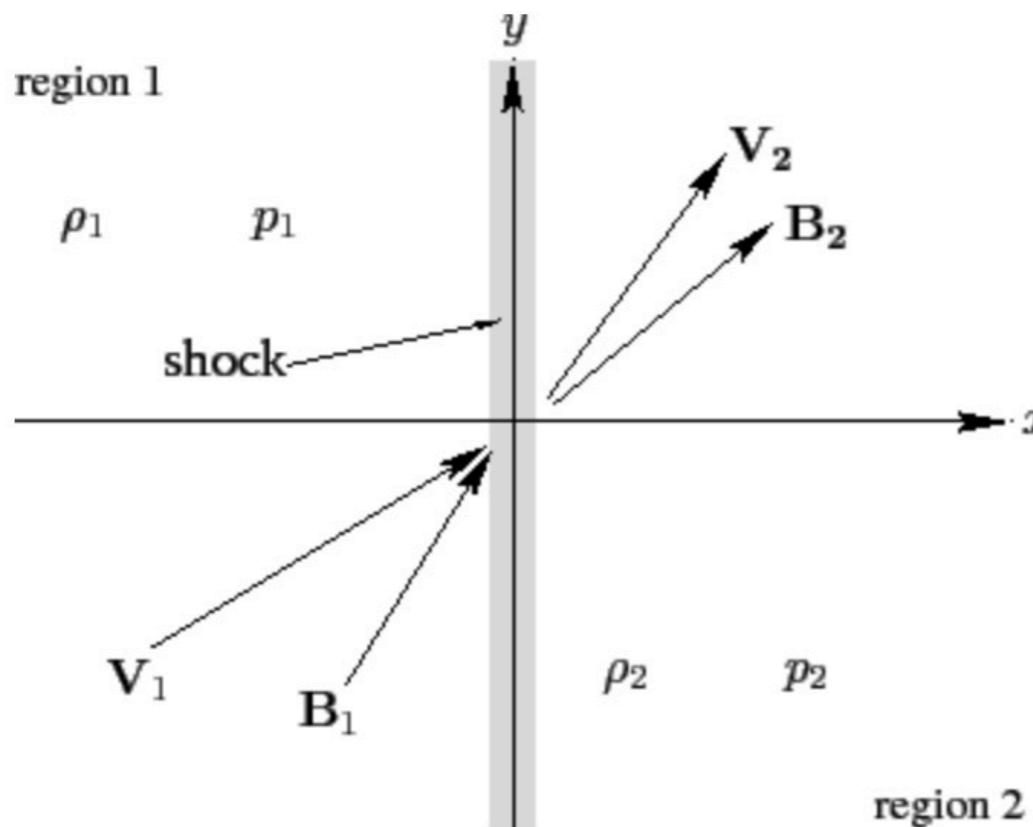


Figure 28: A planar shock.

$$[B_x]_1^2 = 0$$

$$[V_x B_y - V_y B_x]_1^2 = 0$$

$$[\rho V_x]^2_1 = 0$$

$$[\rho V_x^2 + p + B_y^2/2\mu_0]_1^2 = 0$$

$$[\rho V_x V_y - B_x B_y/\mu_0]_1^2 = 0$$

$$\left[ \frac{1}{2} \rho V^2 V_x + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} p V_x + \frac{B_y (V_x B_y - V_y B_x)}{\mu_0} \right]_1^2 = 0$$

Donde:  $[A]_1^2 \equiv A_2 - A_1$

# Choques paralelos

Asumimos que el flujo en el pre- y post-choque viaja paralelo al campo  $B_x$  y perpendicular al frente del choque.

$$\mathbf{V}_1 = (V_1, 0, 0),$$

$$\mathbf{V}_2 = (V_2, 0, 0),$$

$$\mathbf{B}_1 = (B_1, 0, 0),$$

$$\mathbf{B}_2 = (B_2, 0, 0).$$

Reemplazamos en las condiciones de Rankine-Hugoniot:

$$\frac{B_2}{B_1} = 1,$$

Donde:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = r,$$

$$r = \frac{(\Gamma + 1) M_1^2}{2 + (\Gamma - 1) M_1^2},$$

$$\frac{V_2}{V_1} = r^{-1},$$

$$R = 1 + \Gamma M_1^2 (1 - r^{-1}) = \frac{(\Gamma + 1)r - (\Gamma - 1)}{(\Gamma + 1) - (\Gamma - 1)r}.$$

$$\frac{p_2}{p_1} = R,$$

$$M_1 = V_1/V_{S1}, V_{S1} = (\Gamma p_1/\rho_1)^{1/2}$$

# Salto de temperatura

Con las ecuaciones anteriores, podemos estimar el salto en temperatura,  $T$ , a partir de la masa media de partículas en el gas,  $\mu$ , y la constante de Boltzmann,  $k$ :

$$kT/\mu m = p/\rho$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{[2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)]}{(\gamma + 1)^2 M_1^2} \frac{[(\gamma - 1)M_1^2 + 2]}{}$$

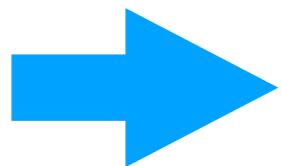
En choques fuertes:  $p_2/p_1$  y  $M_1 \rightarrow \infty$ .

$$\frac{p_2}{p_1} \sim \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_1^2 = \frac{2}{\gamma + 1} \frac{\rho_1 v_1^2}{p_1}$$

# Choques fuertes: $M \gg 1$

En choques fuertes:  $p_2/p_1$  y  $M_1 \rightarrow \infty$ .

$$\frac{p_2}{p_1} \sim \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_1^2 = \frac{2}{\gamma + 1} \frac{\rho_1 v_1^2}{p_1}$$



$$p_2 \sim \frac{2}{\gamma + 1} \rho_1 v_1^2$$

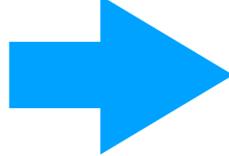
La temperatura es entonces:

$$\boxed{\frac{kT_2}{\mu m} = \frac{2(\gamma - 1)}{(\gamma + 1)^2} v_1^2}$$

# Ejemplo 1: Choque paralelo en 1D

Estudiemos la propagación de un choque con Mach=10:

$$\gamma = \frac{5}{3}$$

Rankine-Hugoniot: 

Shock frame

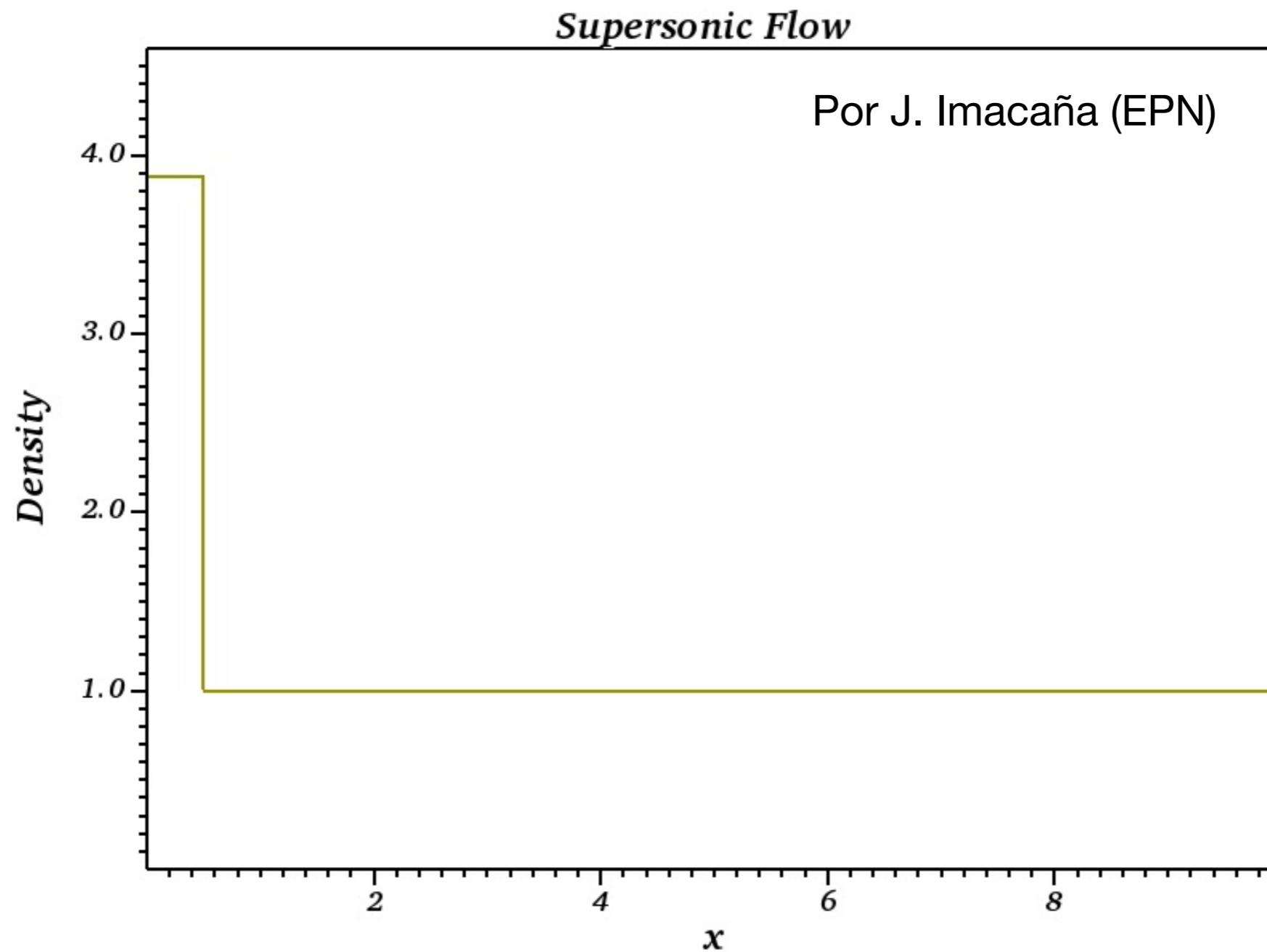
variable	pre-shock	post-shock
$\rho$	1	3.88
p	1	124.75
$\vec{vx}_1$	-12.9 $\mathbf{i}$	-3.32 $\mathbf{i}$
c	1.29	7.32
Mach	10	0.45

Pre-shock frame

variable	pre-shock	post-shock
$\rho$	1	3.88
p	1	124.75
$\vec{vx}_1$	0 $\mathbf{i}$	9.58 $\mathbf{i}$
c	1.29	7.32
Mach	10	0.45

# Ejemplo 1: Choque paralelo en 1D

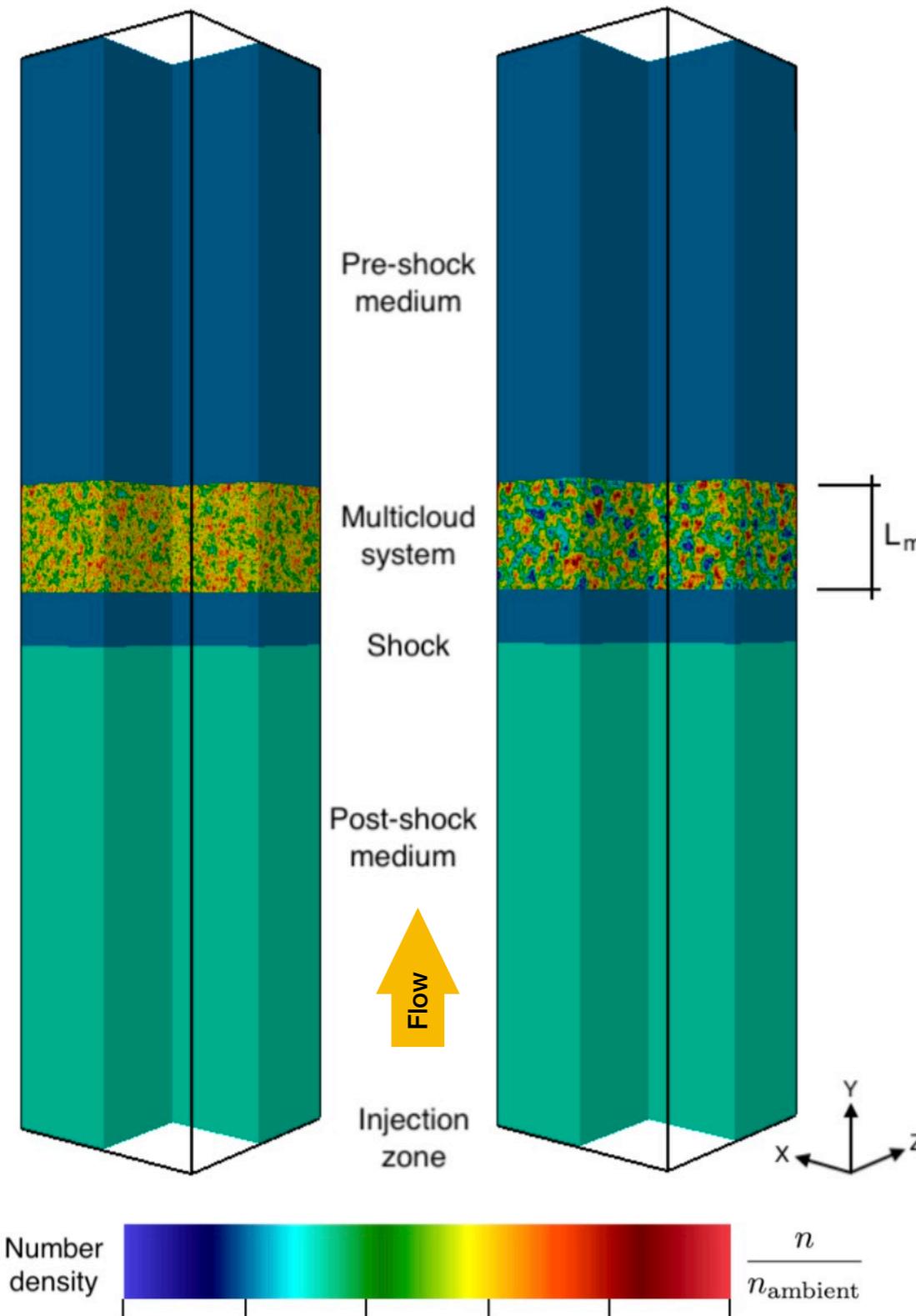
Simulación numérica del choque con Mach=10:



Usamos el código PLUTO: <http://plutocode.ph.unito.it/>

# Ejemplo 2: Interacciones choque-nubes en 3D

Compact layers



Porous layers

Shock Mach number:

$$M_{\text{shock}} = \frac{|v_{\text{shock}}|}{c_{\text{ambient}}} = 10$$

Density contrast:

$$\chi = \frac{\bar{\rho}_{\text{cloud},0}}{\rho_{\text{ambient}}} = \frac{\bar{n}_{\text{cloud},0}}{n_{\text{ambient}}} = 10^2$$

Log-normal density fields (PDFs):

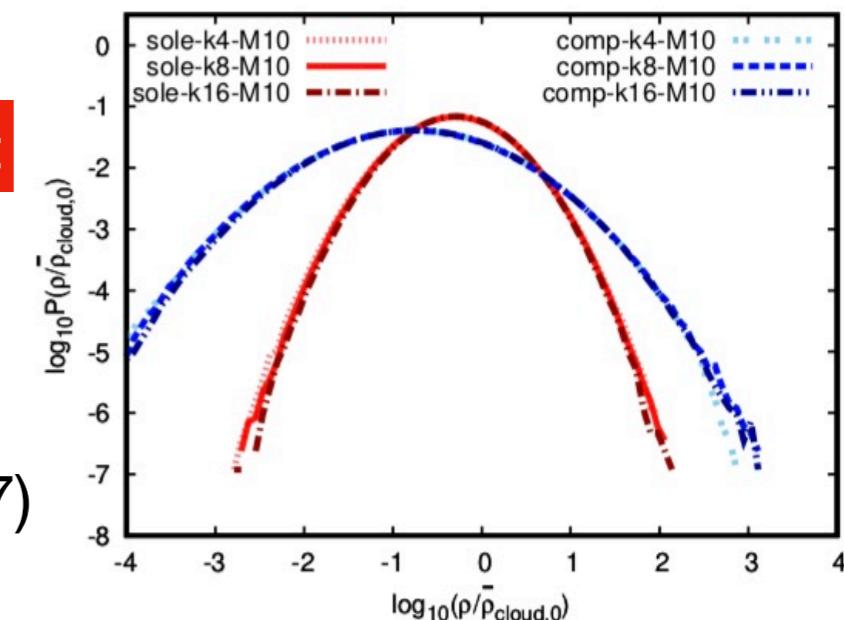
$$\sigma_{\text{cloud}} = \frac{\sigma_{\rho_{\text{cloud},0}}}{\bar{\rho}_{\text{cloud},0}} = 1.9 \text{ or } 5.9$$

Porous

Compact

Code:

Pluto v4.3  
(Mignone et. al. 2007)

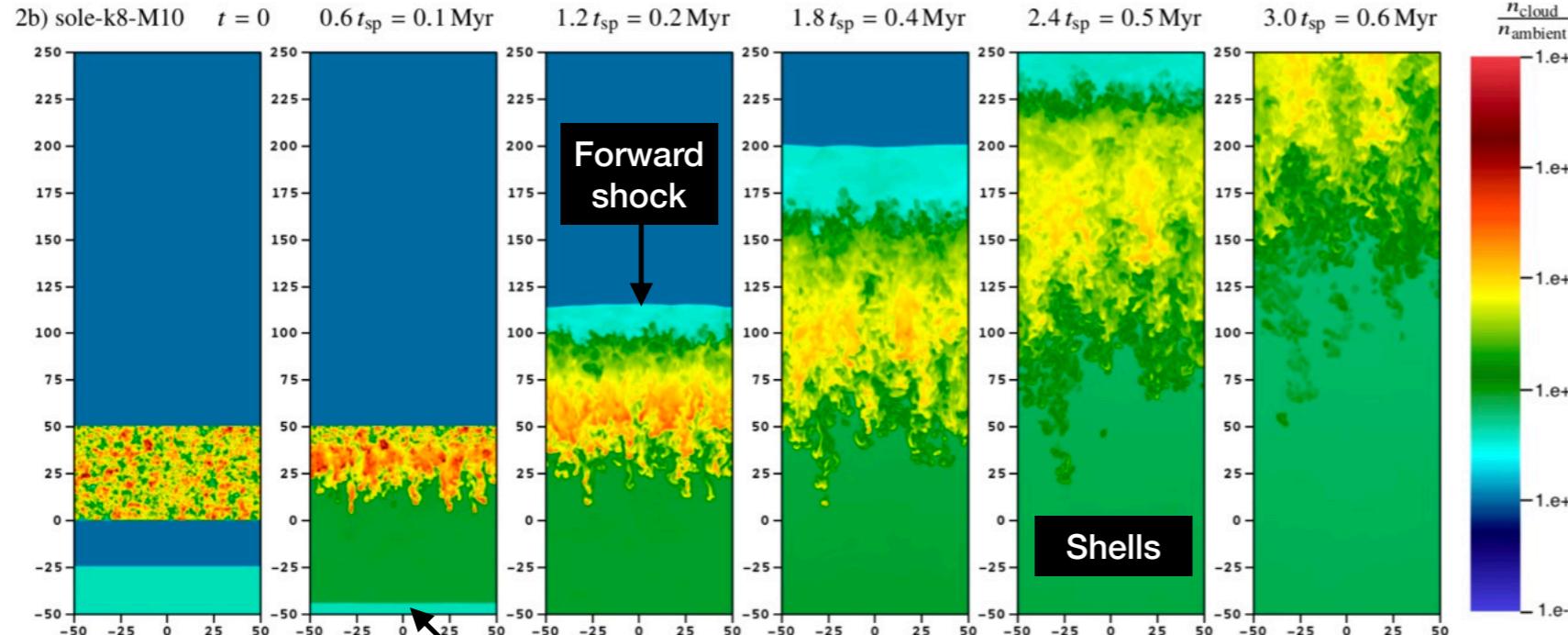


# What are the effects of changing the initial density PDF?

Compact layers

$t_{sp} \equiv$  shock passage time

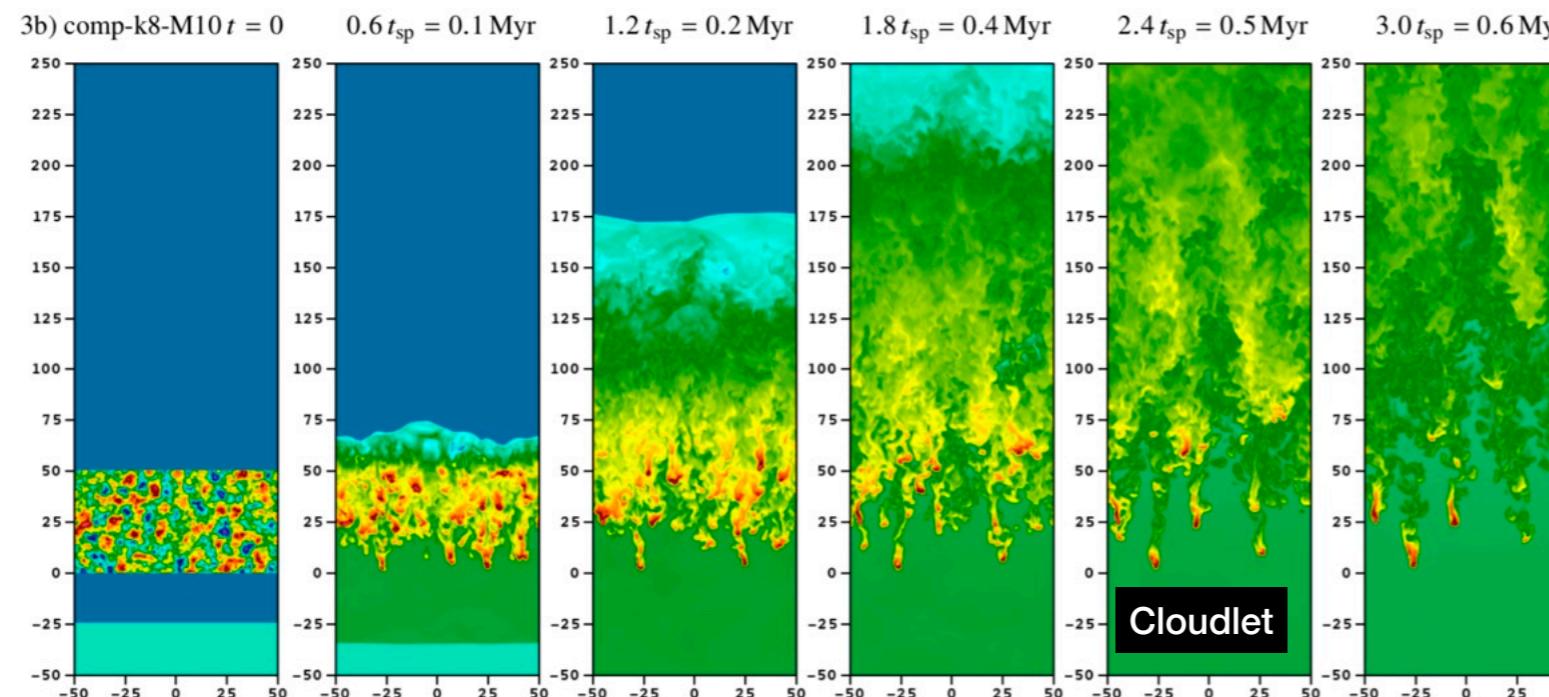
Stages



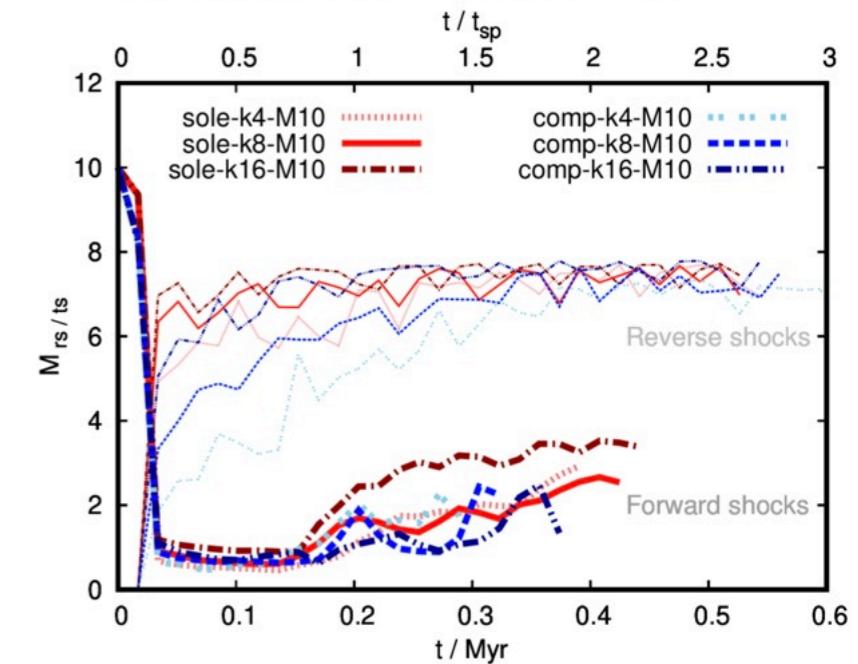
Porous layers

Reverse shock

Vertical extent

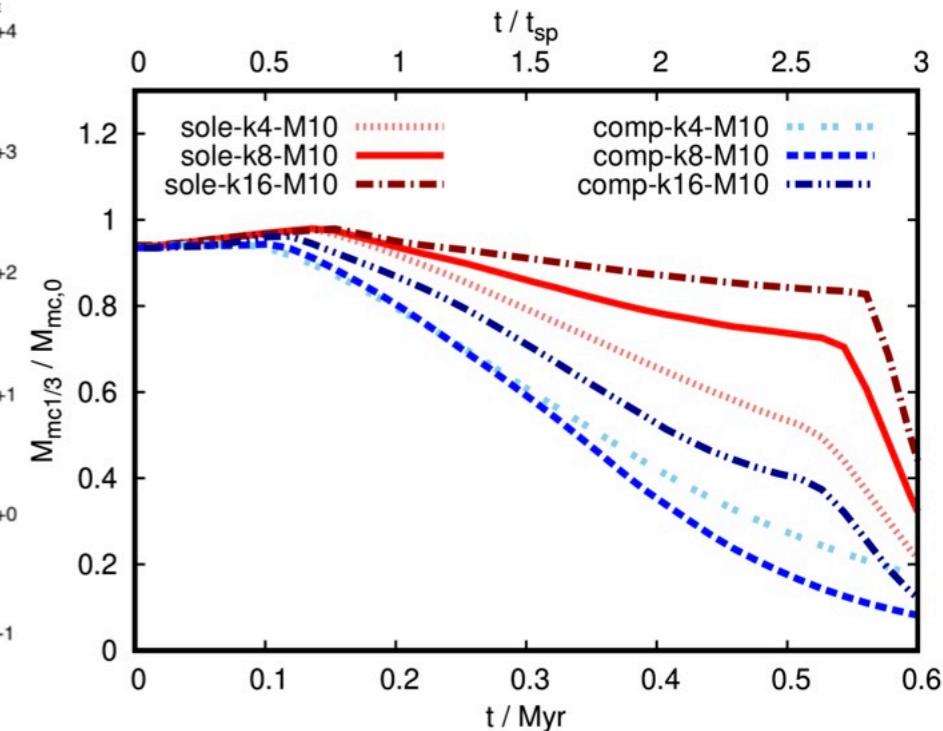


4a) Forward and reverse shock Mach numbers



Mass loss

7c) Mass loss



**Ya tenemos algunas respuestas:**

**1. ¿Qué es una onda de choque?**

Es una perturbación impulsada por la presión de un gas que se propaga más rápido que el sonido en ese gas.

**2. ¿Cómo se forman las ondas de choque?**

Se forman cuando un objeto se mueve a números de Mach  $> 1$ .

**Ya tenemos algunas respuestas:**

**3. ¿Por qué las estudiamos en astrofísica?**

Se observan a todas las escalas estudiadas.

Producen emisión térmica y no térmica.

**4. ¿Con qué herramientas contamos para su estudio?**

Telescopios -> Observaciones

Super-computadoras -> Teoría y simulaciones

# Para finalizar...

- Estamos organizando charlas sobre física en general:



<https://x.com/CienciaLatitud0>

<https://www.facebook.com/investigadoreslatitudcero/>

**¡Gracias por su atención!**