

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



## Relaciones de escala para jets hidrodinámicos en astrofísica

Martín Huarte Espinosa

<mhuarte@astroscu.unam.mx>

Facultad de Ciencias

Instituto de Astronomía

Director de Tesis: Sergio Mendoza

Examen profesional  
Facultad de Ciencias UNAM

Noviembre 23 de 2004

# 1. Introducción

## Jets Astrofísicos

En 1918 Curtis observó la galaxia elíptica M87 (NGC 4486, 3C 274 o Virgo A) y describió sus características como “...un curioso chorro recto ... aparentemente conectado con el núcleo a través de una línea delgada de materia...”.



# Radio galaxias, NAG y Cuasares

Con el nacimiento de la radio astronomía se descubrieron fuentes de emisión de radio en nuestra galaxia y fuera de ella.

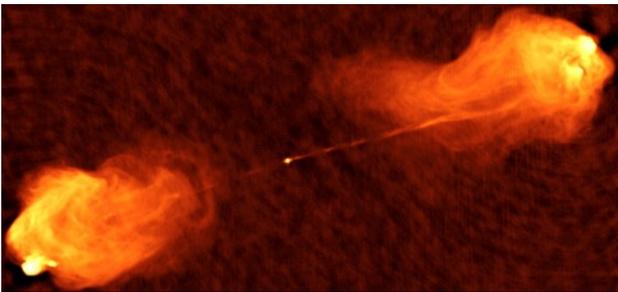
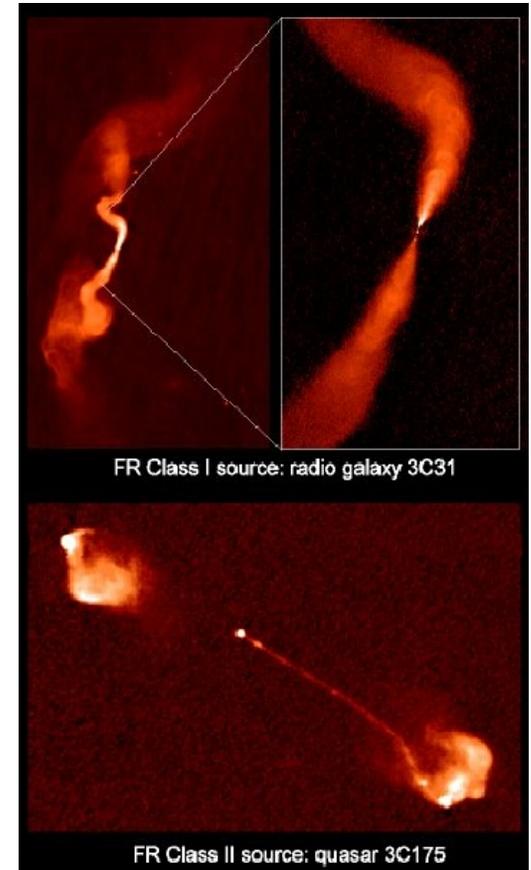


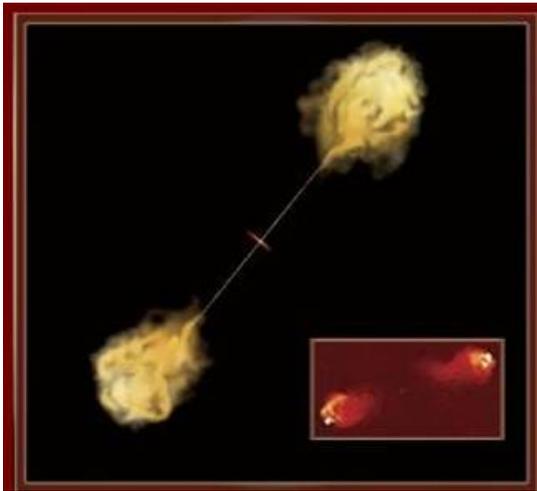
Imagen de alta resolución de la radio galaxia Cygnus A



Arreglo interferométrico de radio telescopios en Nuevo México.



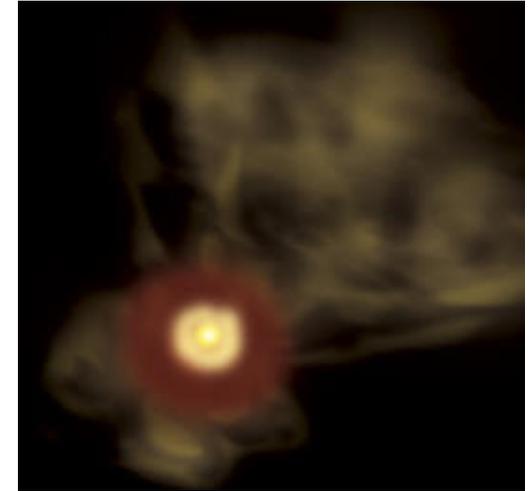
# Clasificación



Radio galaxia



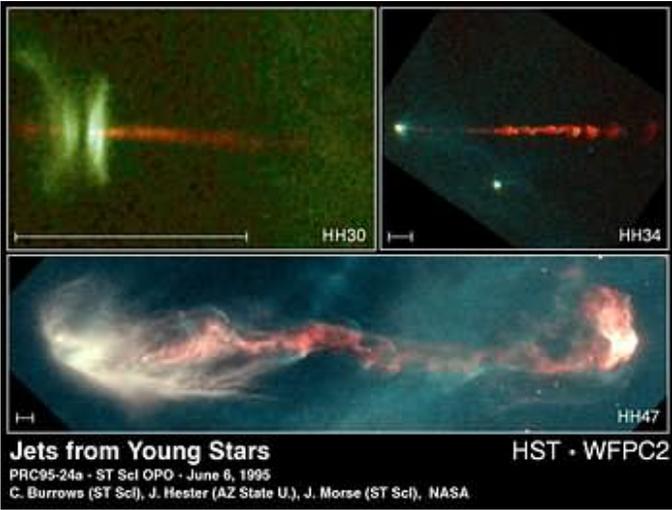
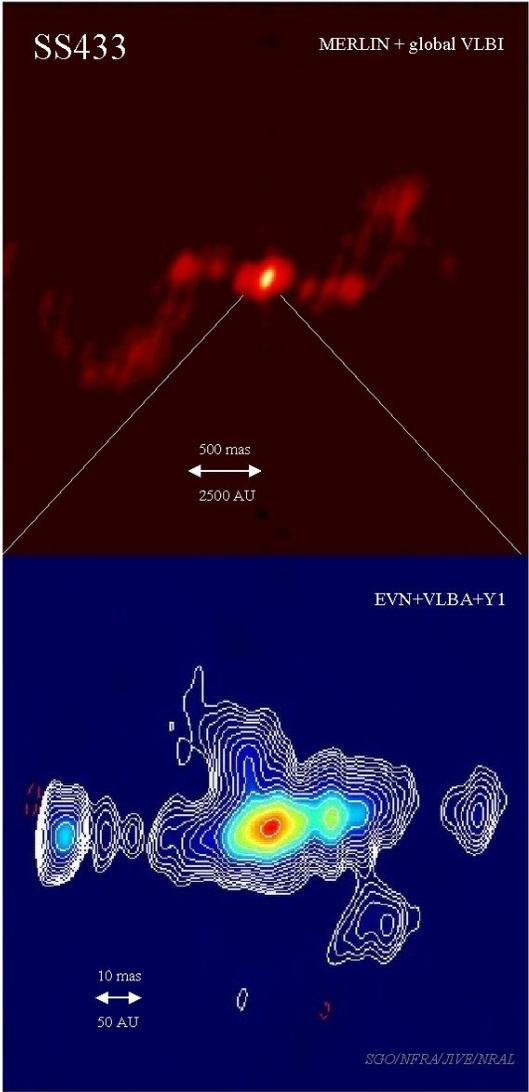
Syfert



Blazar

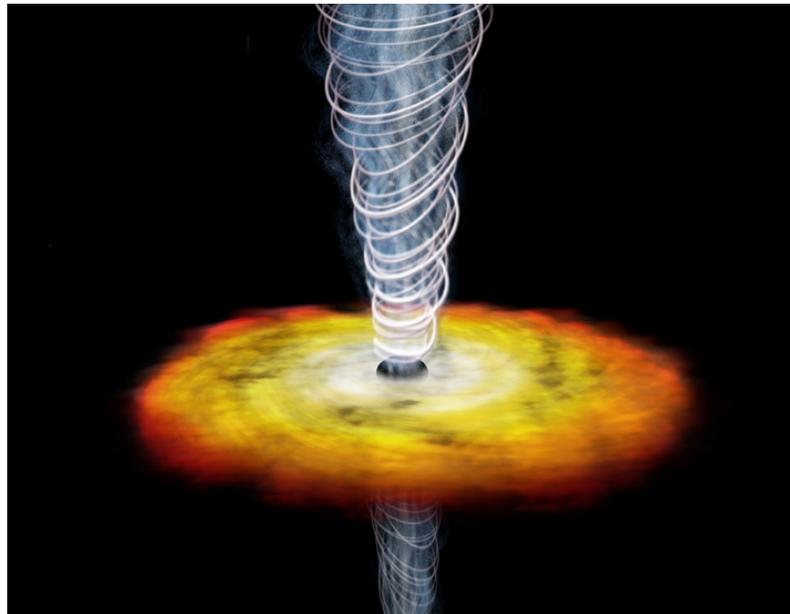
Núcleo Activo de Galaxia (NAG)

# Binarias de rayos X, microcuasares y objetos Herbig-Haro (H-H)



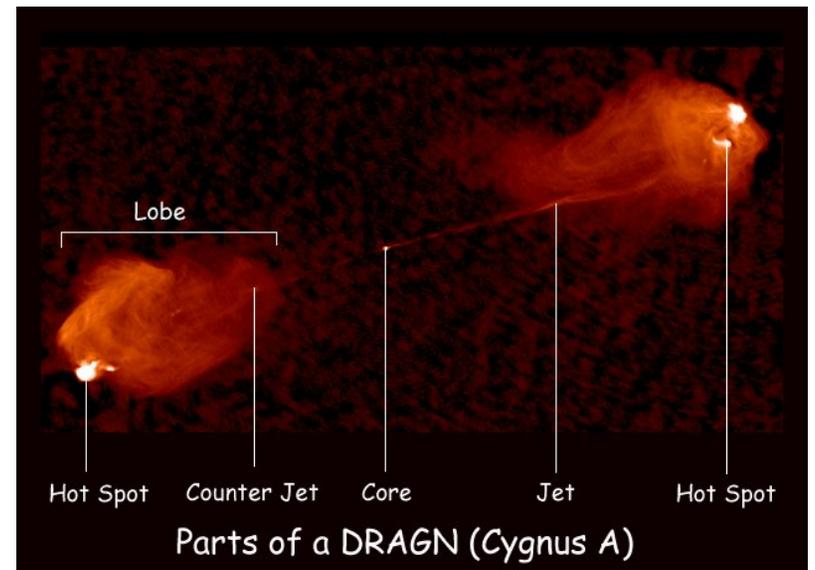
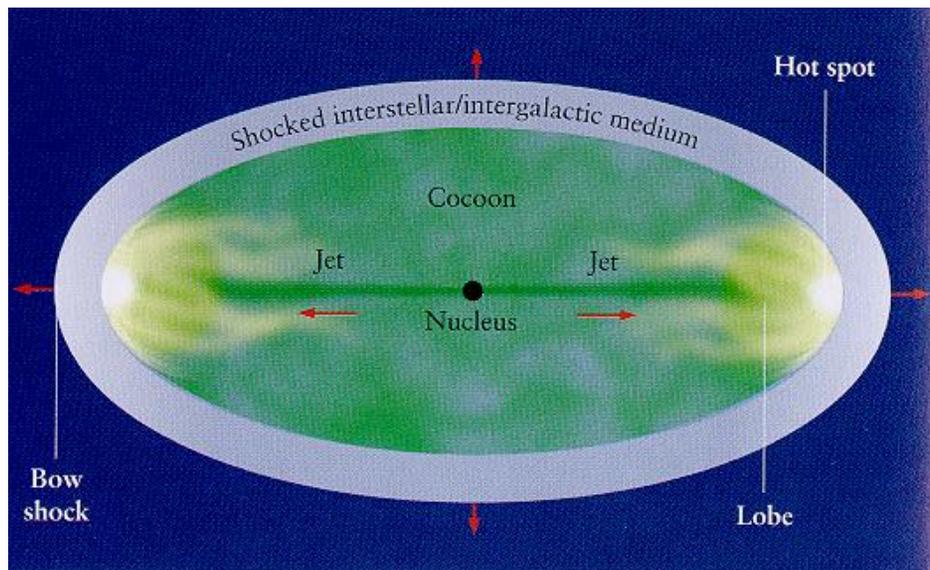
Todos estos jets astrofísicos comparten las siguientes propiedades:

- ❖ Objeto compacto central (estrella recién formada, estrella de neutrones o agujero negro),
- ❖ Disco de acreción alrededor del objeto central,
- ❖ Campos magnéticos “zurcidos” al disco de acreción,
- ❖ Un mecanismo de colimación para el jet,
- ❖ Dos “lóbulos” simétricos respecto al núcleo que emiten radiación.
- ❖ Los asociados con flujos relativistas (cuasares y microcuasares) presentan movimientos superlumínicos aparentes.

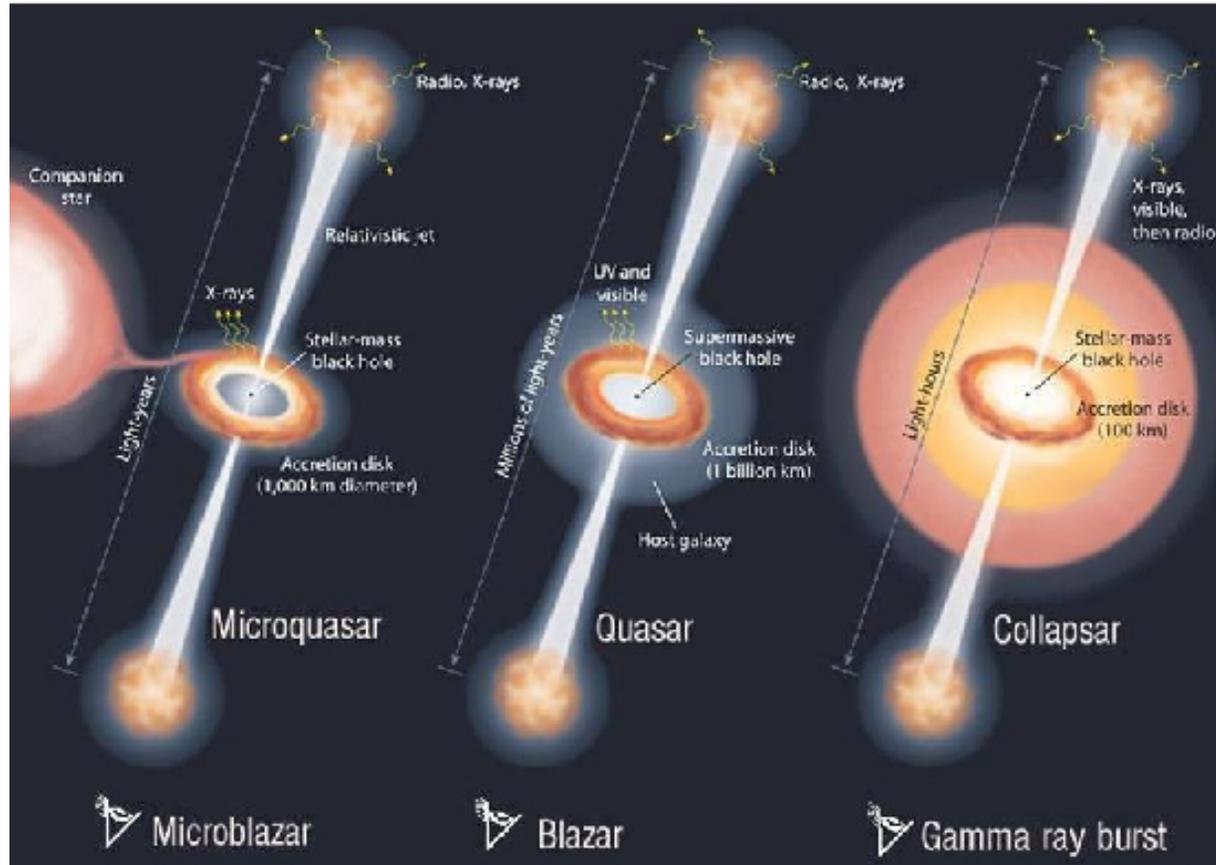


# Modelos Teóricos

Scheuer (1974) desarrolló el modelo estándar para la evolución de un jet extragaláctico, el cual puede extenderse a jets astrofísicos de menor escala.



# En resumen



El diagrama no está a escala.

# Leyes de escala para agujeros negros

Sams et al. (1996) mostraron que la física en todos los sistemas dominados por agujeros negros es la misma y es gobernada por leyes de escalamiento. Es decir, para agujeros negros con masa  $M_a$  ocurre que

- ★  $L_s \propto M_a \Rightarrow L_s/L_{\text{Edd}} = cte$  la luminosidad cinética de salida,
- ★  $T_{\text{acreción}} \propto M_a^{-1/4}$  la temperatura del disco de acreción,
- ★  $r_s \propto M_a$  el radio del horizonte de eventos,
- ★  $\rho_{\text{acreción}} \propto M_a^{-1}$  la densidad de acreción,
- ★  $t_{\text{orbital}} \propto M_a$  el tiempo en que una partícula da una vuelta en la última órbita estable del agujero negro.

son proporcionales a la masa del agujero negro elevada a alguna potencia.

## 2. Objetivo

Cuasares + microcuasares + movimientos superlumínicos + leyes de escala  $\Rightarrow$  unificación.

¿Cómo?

Encontrar unas leyes de escala hidrodinámicas para los jets astrofísicos análogas a las leyes de escala para agujeros negros. Esto con la finalidad de encontrar expresiones matemáticas concretas que relacionen las variables importantes en la producción y flujo de los jets.

### 3. Análisis

#### Teorema $\Pi$ de Buckingham (1914) del análisis dimensional

Consideremos  $n + 1$  cantidades físicas  $a, a_1, a_2, \dots, a_n$  relacionadas mediante una ley física  $f$  tal que

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_n), \quad (1)$$

donde

$$[a_{k+1}] = \prod_{i=1}^k [a_i]^{p_i}, \quad [a_{k+2}] = \prod_{i=1}^k [a_i]^{q_i}, \quad \dots, \quad [a_n] = \prod_{i=1}^k [a_i]^{r_i}. \quad (2)$$

Escogemos  $[a_i]' = \alpha_i [a_i]$ ,  $\alpha_i = [a_i]^{-1}$

$\Rightarrow a_i = 1$  independientes con  $i = 1, 2, \dots, k$  y además

$$\Pi \equiv \frac{[a]}{\prod_{i=1}^k [a_i]^{l_i}}, \quad \Pi_{k+1} \equiv \frac{[a_{k+1}]}{\prod_{i=1}^k [a_i]^{p_i}}, \quad \dots, \quad \Pi_n \equiv \frac{[a_n]}{\prod_{i=1}^k [a_i]^{r_i}}, \quad (3)$$

que son adimensionales.

# Relaciones dimensionales para jets

Las cantidades características en la producción y flujo de los jets astrofísicos están relacionadas de la siguiente manera:

$$L_s = L_s(\dot{M}, M_a, c, G, \Omega, B, l, v, \rho).$$

Usando el teorema  $\Pi$  de Buckingham

$\Rightarrow$

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{L_s}{\dot{M}c^2}, & \Pi_2 &= \frac{G\dot{M}}{c^3}, & \Pi_3 &= \frac{Bc^{1/2}M_a}{\dot{M}^{3/2}}, & \Pi_4 &= \frac{l\dot{M}}{M_a c}, & (4) \\ \Pi_5 &= \frac{\Omega\dot{M}}{M_a^2 c^2}, & \Pi_6 &= \frac{v}{c}, & \Pi_7 &= \frac{\rho c^3 M_a^2}{\dot{M}^3}. \end{aligned}$$

Del segundo parámetro se sigue que

$$\Pi_2 = \left( \frac{GM_a}{c^2} \right) \left( \frac{\dot{M}}{M_a} \right) \frac{1}{c}.$$

$[M_a/\dot{M}] = \text{tiempo} \Rightarrow \tau$  tiempo característico:

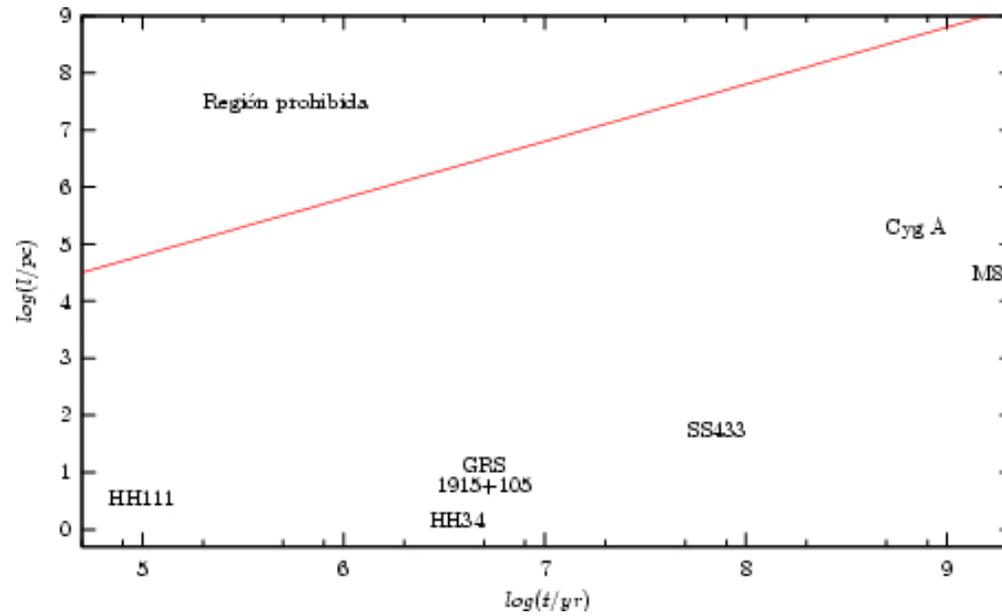
$$\tau \equiv \frac{M_a}{\dot{M}}. \quad (5)$$

Este es el tiempo en que el objeto central con masa  $M_a$  acreta una masa del orden de la suya. Siendo así, entonces

$$\Pi_2 = \left( \frac{r_S}{2} \right) \left( \frac{1}{\tau} \right) \left( \frac{1}{c} \right) = \frac{r_S}{2\tau c}. \quad (6)$$

Tenemos una distancia  $\lambda$  dada por

$$\lambda \approx 2c\tau. \quad (7)$$



De la ecuación (4) se encuentra

$$\Pi_8 \equiv \Pi_2^{3/2} \Pi_3 = \frac{BM_a G^{3/2}}{c^4} = \left( \frac{M_a G}{c^2} \right)^{3/2} / \frac{\sqrt{M_a c^2}}{B}, \quad (8)$$

$\Rightarrow$

$$r_j \propto \frac{M_a^{1/3} c^{2/3}}{B^{2/3}} \approx 10^2 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^{1/3} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^{-2/3} \text{ pc.} \quad (9)$$

Ejemplos:

- ★ Para la radio galaxia M87  $r_j \propto 10^4 \text{ pc}$   
con  $M_a \approx 2.5 \times 10^9 M_\odot$ ,  $B \approx 100 \text{ G}$  y  $r_j \approx 5 \times 10^3 \text{ pc}$
- ★ Para el objeto T Tau  $r_j \propto 1 \text{ pc}$   
con  $M_a \approx 16 M_\odot$ ,  $B \leq 200 \text{ G}$  y  $r_j \approx 0.72 \text{ pc}$

$\therefore \propto \approx 1$  y tenemos que

$$r_j \approx 100 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^{1/3} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^{-2/3} \text{ pc.} \quad (10)$$

Retomando la ecuación (8) tenemos que

$$\Pi_8 = \Pi_2^{3/2} \Pi_3 = \frac{(Bl^{3/2}) (GM_a^2/l)^{3/2}}{(M_a c^2)^2} \ll 1, \quad (11)$$

y por lo tanto

$$B \ll \frac{c^4}{G^{3/2} M_a} \approx 10^{23} (M_a/M_\odot)^{-1} \text{ G}. \quad (12)$$

Ejemplos:

- ★ Para la radio galaxia M87  $B \ll 10^{13} \text{ G}$   
con  $M_a \approx 2.5 \times 10^9 M_\odot$  y  $B \approx 100 \text{ G}$
- ★ Para el objeto T Tau  $B \ll 10^{21} \text{ G}$   
con  $M_a \approx 16 M_\odot$  y  $B \leq 200 \text{ G}$

Finalmente, con la ecuación (4) hacemos

$$\Pi_{10} \equiv \frac{\Pi_1}{\Pi_2 \Pi_3^2} = \frac{L_s \dot{M}}{B^2 M_a^2 G},$$

de donde se obtiene

$$L_s \propto 10^{-7} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^2 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^2 \left( \frac{\dot{M}}{M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{-1} L_\odot. \quad (13)$$

Ejemplos:

★ Para la radio galaxia M87  $L_s \propto 10^{21} L_\odot$

con  $M_a \approx 2.5 \times 10^9 M_\odot$ ,  $B \approx 100 \text{ G}$ ,  $\dot{M} \approx 4 M_\odot \text{ yr}^{-1}$  y  $L_s \approx 10^{7-9} L_\odot$

★ Para el objeto T Tau  $L_s \propto 10^6 L_\odot$

con  $M_a \approx 16 M_\odot$ ,  $B \leq 100 \text{ G}$ ,  $\dot{M} \approx 4.8 \times 10^{-8} M_\odot \text{ yr}^{-1}$  y  $L_s \approx 10^{-1} - 10^2 L_\odot$

$\therefore \propto \approx 10^{-7}$  y obtenemos

$$L_s \approx 10^{-14} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^2 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^2 \left( \frac{\dot{M}}{M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{-1} L_\odot. \quad (14)$$

## 4. Conclusiones

- ★ Los jets astrofísicos existen debido a una combinación precisa entre procesos electromagnéticos, mecánicos y gravitacionales, independientemente de la masa y la naturaleza de sus objetos centrales.
- ★ Nuestras relaciones de escala hidrodinámicas para jets astrofísicos son:

$$\tau \propto \frac{M_a}{\dot{M}}, \quad (15)$$

$$r_j \approx 100 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^{1/3} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^{-2/3} \text{ pc}, \quad (16)$$

$$B \ll 10^{23} (M_a/M_\odot)^{-1} \text{ G}, \quad (17)$$

$$L_s \approx 10^{-12} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^2 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^2 \left( \frac{\dot{M}}{M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{-1} L_\odot. \quad (18)$$

★ Para los Destellos de Rayos Gama (GRB) largos

$$r_j \approx 10^9 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^{1/3} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^{-2/3} \text{ pc}, \quad (19)$$

$$L_s \approx 10^{-5} \left( \frac{B}{1 \text{ G}} \right)^2 \left( \frac{M_a}{M_\odot} \right)^2 \left( \frac{\dot{M}}{M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{-1} L_\odot. \quad (20)$$

con  $B \gtrsim 10^{16} \text{ G}$

esto se debe a que los parámetros adimensionales no tienen por que ser constantes. Los GRB difieren importantemente con los otros jets astrofísicos en muchos aspectos.