Acreción

→ Proceso en el cual materia cae al pozo de potencial gravitacional de un objeto astrofísico

Regímenes de Acreción

V_{rel} : velocidan relativa de la materia con respecto al acretor

c_s : velocidad del sonido en la materia

- **Acreción Esférica:** - Momento angular insignificante
  - $V_{rel} \ll c_s$

- **Acreción Cilíndrica:** - Momento angular pequeño
  - $V_{rel} \gtrsim C_s$

- **Disco de Acreción:** - Momento angular suficientemente grande para la formación de la estructura

- **Acreción de dos flujos:** - Acreción cuasi-esferica coexistiendo con un disco de acreción.

Acreción Esferica

→ Gas completamente ionizado

→ Estructura de acreción isotrópica y "estable" (i.e. la estructura no se desintegrará)

- Fuerza de Radiación

$F = \frac{L}{4\pi r^2}$ Flujo de energía a una distacia r $[erg\ s^{-1} cm^{-2}]$

L: Luminosidad bolométrica $[erg \cdot s^{-1}]$

Para fotones: $p^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$

$$\downarrow$$

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2} - |\vec{p}|^2 = 0 \rightarrow |\vec{p}| = \frac{E}{c}$$

El flujo de momentum o "presión" es

$P_{rad} = \frac{F}{c} = \frac{L}{4\pi r^2 c}$: Presión de radiación

La fuerza de radiación ejercida sobre un electrón es

$$\vec{f}_{rad} = P_{rad}\, \sigma_e\, \hat{r}$$

$$\boxed{\vec{f}_{rad} = \frac{L}{4\pi r^2 c} \sigma_e \hat{r}}$$

σ_e: Sección transversal de Thomson

$$\sigma_e = \frac{8\pi}{3}\left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2 \approx 6.65 \times 10^{-25}\ cm^2$$

NOTA: La interacción con protones es más pequeña en un factor de $\left(\frac{m_p}{m_e}\right)^2 \sim 3\times10^6$ y por ello es despreciable.

- Fuerza Gravitacional:

La fuerza gravitacional entre el objeto central (M) y un par electrón-protón es

$$\vec{f}_{grav} = -\frac{GM(m_p+m_e)}{r^2}\hat{r}$$

$$\boxed{\vec{f}_{grav} \simeq -\frac{GMm_p}{r^2}\hat{r}}$$

Para prevenir la desintegración de la estructura de acreción, se necesita que

$$|f_{rad}| \leq |f_{grav}|$$

$$\frac{L}{4\pi r^2 c}\sigma_e \leq \frac{GMm_p}{r^2}$$

$$\boxed{L \leq \frac{4\pi G m_p c}{\sigma_e} M}$$

$$L \leq 6.31\times10^4 M \;[\mathrm{erg\ s^{-1}}] \sim 1.26\times10^{38}\left(\frac{M}{M_\odot}\right) [\mathrm{erg\ s^{-1}}]$$

$\uparrow$ en [gr]

LUMINOSIDAD DE EDDINGTON

La luminosidad de Eddington es el valor crítico

$$\boxed{L_E = 1.3\times10^{38}\left(\frac{M}{M_\odot}\right) [\mathrm{erg\ s^{-1}}]}$$

Esta es la luminosidad máxima que puede tener una fuente de masa M con acreción esférica.

Masa de Eddington

Dada la luminosidad L de una fuente, la masa del objeto central debe cumplir

$$M \gtrsim \frac{\sigma_e}{4\pi G m_p c} L$$

$$M \gtrsim \frac{L}{1.26 \times 10^{38}} \ [M_\odot] \sim 8 \times 10^5 \ L_{44} \ [M_\odot]$$

donde L_{44} es la luminosidad bolométrica en unidades de 10^{44} erg·s^{-1} (se toma esta unidad por ser característica en los AGNs)

El valor crítico de masa se denomina Masa de Eddington

$$\boxed{M_E = 8 \times 10^5 \ L_{44} \quad [M_\odot]}$$

Masa mínima para el objeto central en una fuente con luminosidad L_{44}

En los AGNs se han observado $L \sim 10^{43} - 10^{47}$ erg·s^{-1}

Esto implica la existencia de un objeto central supermasivo con

$M \gtrsim 10^5 - 10^9 \ M_\odot$

Razon de Acreción de Eddington

La luminosidad [$erg \cdot s^{-1}$] es una fracción de la energía relativista de la masa que acreta, $E = mc^2$. La otra fracción va hacia el objeto compacto para hacer crecer su masa.

$$L \propto \frac{dE}{dt} = \frac{dm}{dt} c^2 \qquad \frac{dm}{dt} = \frac{dM}{dt} = \dot{M}$$

← Razón de crecimiento de la masa del objeto compacto

$$L \propto \dot{M} c^2$$

$$\boxed{L = \eta \dot{M} c^2}$$

η: Eficiencia del proceso de acreción

Se espera que $\eta \sim 0.1 = 10\%$

La energía potencial gravitacional tiene la forma

$$U = \frac{GMm}{r}$$

La razón de conversión de energía potencial a radiación es la luminosidad

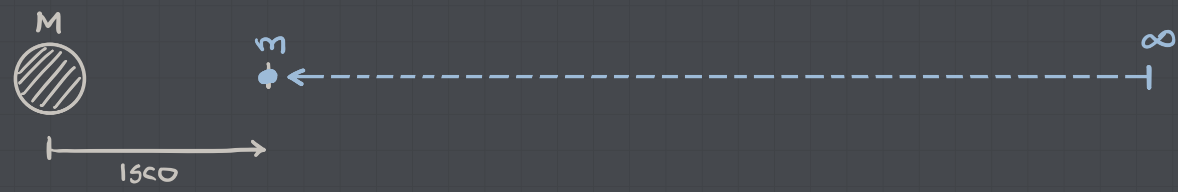
$$L = \frac{GM}{r} \frac{dm}{dt}$$

$$\boxed{L = \frac{GM}{r} \dot{M}}$$

Al comparar con la ecuación anterior, se concluye que la eficiencia es

$$\boxed{\eta = \frac{GM}{rc^2}}$$

• Un estimado para η:



Considere una partícula de masa m que cae radialmente desde $r \to \infty$ hasta la Ultima Orbita Circular Estable, (Innermost Stable Circular Orbit ISCO) cuyo radio es

$$r_{ISCO} = 3 r_{Sch} = \frac{6GM}{c^2}$$

El cambio en la energía potencial gravitacional es

$$\Delta U = \frac{GMm}{r_{ISCO}} = \frac{GM}{6GM} mc^2 = 0.16\, mc^2$$

Si toda la energía gravitacional se convierte en radiación, se tiene que

$$\eta \sim 0.16$$

Utilizando un $\eta \sim 0.1$, se tiene que la energia liberada en este proceso es

$\Delta E_{acc} = 0.1\, mc^2 \longrightarrow \Delta E_{acc} \sim 9 \times 10^{19}$ erg por cada gramo

$\Delta E_{acc} \sim 10^{20}$ erg por gramo

Si se considera una estrella de neutrones con $M \sim M_\odot$ y la particula cae hasta su superficie, $R_* \sim 10\,\text{Km}$, se tiene

$$\Delta E_{acc}^{NS} \sim \frac{GM_\odot}{R_*} m \sim 10^{20} \text{ erg por gramo}$$

Con el fin de comparar la acreción con otras formas de producción de energía, se suele considerar la fusión nuclear de H $\longrightarrow$ He.

De acuerdo con Frank Shu - "The Physical Universe: An Introduction to Astronomy". Ch. 5 (1982)

la eficiencia del proceso $4H \longrightarrow He$ en el Sol tiene

$\eta \sim 0.007 = 0.7\%$

Esto implica que la liberación de energía por fusión será de

$\Delta E_{fus} \sim 6 \times 10^{18}$ erg por gramo.

Por ello,

$$\frac{\Delta E_{acc}}{\Delta E_{fus}} \sim 10^{2}$$

Ya que se tiene

$$L = \frac{GM}{r}\dot{M} \qquad \eta = \frac{GM}{rc^2}$$

podemos escribir

$$\boxed{\dot{M} = \frac{L}{\eta c^2}}$$

Utilizando las unidades adecuadas:

$$\dot{M} = 1.77 \times 10^{-2} \left(\frac{\eta}{0.1}\right)^{-1} L_{44} \quad \left[\frac{M_\odot}{yr}\right]$$

Para AGNs, un valor típico es $L_{acc} \sim 10^{47}\ erg \cdot s^{-1}$

- Si $\eta = 0.007$ (como en la fusión $4H \rightarrow He$) se obtiene

$\dot{M} \sim 250\ M_\odot yr^{-1}$ ← Muy grande!!

- Si $\eta = 0.1$ se tiene

$\dot{M} \sim 20\ M_\odot yr^{-1}$

De forma similar, la razón de acreción de Eddington satisface

$$\dot{M}_E = \frac{L_E}{\eta c^2}$$

$$\dot{M}_E = 1.67 \times 10^{16} \frac{M}{M_\odot} \left(\frac{\eta}{0.1}\right)^{-1} \left[\frac{gr}{s}\right]$$

$$\dot{M}_E = 2.67 \times 10^{-8} \frac{M}{M_\odot} \left(\frac{\eta}{0.1}\right)^{-1} \left[\frac{M_\odot}{yr}\right]$$

$$\boxed{\dot{M}_E = 3 M_8 \left(\frac{\eta}{0.1}\right)^{-1} \left[\frac{M_\odot}{yr}\right]}$$

$$M_8 = \frac{M}{10^8 M_\odot}$$

Maxima razón de acreción para una masa M

Que sucede si una fuente tiene $\dot{M} > \dot{M}_E$?

→ Si existe simetría esferica: debe determinarse con exactitud el valor de η

Si $\eta < 0.1$ ⟶ El flujo de energía disminuye

→ Si no existe simetría esferica: el modelo cambia y debe volver a estudiarse todo el desarrollo.

$\dot{M}$ puede exceder $\dot{M}_E$ en modelos no-esfericos.

Tiempo de Crecimiento

$$\dot{M} = \frac{dM}{dt} = \frac{L}{\eta c^2}$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{\eta c^2}\left(\frac{4\pi G c m_p}{\sigma_e} M\right)\frac{L}{L_E}$$

$$\int \frac{dM}{M} = \frac{4\pi G m_p}{\eta c \sigma_e}\frac{L}{L_E}\int dt$$

$$M(t) = M_o \exp\left(\frac{4\pi G m_p}{\eta c \sigma_e}\frac{L}{L_E} t\right)$$

$$\boxed{M(t) = M_o e^{t/t_c}} \qquad \boxed{t_c = \frac{\eta c \sigma_e}{4\pi G m_p}\frac{L_E}{L}}$$

$$t_c \simeq 3.7 \times 10^8 \, \eta \frac{L_E}{L} \quad [yr]$$

Para $L \simeq L_E \rightarrow$ El agujero negro crece exponencialmente en escalas de tiempo del orden $\sim 10^8$ yr.

Referencias

[1] Bradley Peterson. An Introduction to AGN. Cambridge U. Press (1997)

[2] J. Frank. Accretion Power in Astrophysics (2002)