

# Introducción a la Astrofísica Relativista

## Práctica 3: aceleración de partículas

1. Se modela un pulsar como un dipolo rotante que genera una diferencia de potencial. ¿Hasta qué energía podrían acelerarse partículas en un pulsar de período  $P = 0.1$  s y campo magnético  $B = 10^{12.5}$  G? ¿Cuál es el giroradio de estas partículas? Considerar que las estrellas de neutrones tienen radios de  $\sim 10^6$  cm.
2. La Figura 1 muestra los valores de campo magnético típico en función del tamaño lineal para distintos aceleradores de partículas. A partir de la cota que provee el giroradio (criterio de Hillas), ¿hasta qué energía máxima es posible acelerar partículas en cada sistema? ¿Cuáles serían las potenciales fuentes de los rayos cósmicos ultraenergéticos ( $E \sim 10^{20}$  eV)?

Nota: más adelante veremos que las energías máximas predichas por el criterio de Hillas no siempre se alcanzan. ¿Por qué puede ser?

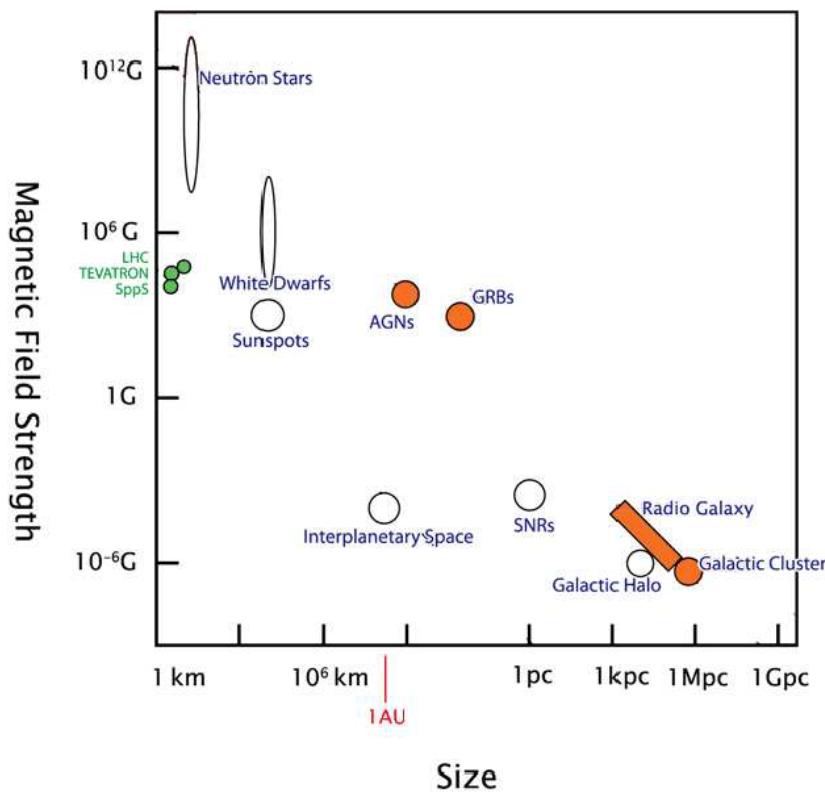


Figura 1: Ubicación en el diagrama de Hillas de varios potenciales aceleradores de rayos cósmicos. Las abreviaturas significan AGN: Active Galactic Nucleus (núcleo galáctico activo), GRB: Gamma-Ray Burst (erupción de rayos gamma), SNR: Supernova Remnant (remanente de supernova).

3. Una partícula de prueba sufre múltiples interacciones y en cada una experimenta una pequeña variación en su energía  $\Delta E = \zeta E$ . Mostrar que el espectro de una distribución de partículas aceleradas por un mecanismo de este tipo es una ley de potencias

$$\frac{dQ}{dE}(E) \propto E^{-\Gamma}, \quad (1)$$

donde el índice espectral vale

$$\Gamma = 1 - \frac{\ln(1 - P_{\text{esc}})}{\ln(1 + \zeta)}, \quad (2)$$

y  $P_{\text{esc}}$  es la probabilidad de que en cada interacción la partícula escape de la región de aceleración.

4. a) Mostrar que la variación promedio en la energía de una partícula relativista acelerada por un mecanismo estocástico tipo Fermi de segundo orden es

$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \approx \frac{4}{3} \left( \frac{V}{c} \right)^2, \quad (3)$$

donde  $V$  es la velocidad de los centros dispersores.

- b) En la propuesta original de Fermi (1949) para acelerar rayos cósmicos, los centros dispersores son nubes interestelares magnetizadas con velocidades no relativistas orientadas al azar. ¿Cuáles serían las desventajas o potenciales problemas de este modelo?

5. a) Mostrar que para una onda de choque fuerte ( $M \gg 1$ ) el factor de compresión del gas es

$$\zeta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}. \quad (4)$$

- b) Mostrar que la variación promedio en la energía de una partícula relativista que cruza un frente de choque y regresa a la región de salida es

$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \approx \frac{4}{3} \left( \frac{\zeta - 1}{\zeta} \right) \frac{v_{\text{ch}}}{c}, \quad (5)$$

donde  $v_{\text{ch}}$  es la velocidad del frente de choque.

6. Protones relativistas son acelerados en un frente de choque. Deducir la forma del espectro diferencial de energía de los protones si la probabilidad de que vuelvan a cruzar el frente es de 80% y la ganancia fraccional de energía por cruce de frente es de 20%.

7. La reconexión magnética es un proceso mediante el cual pueden acelerarse partículas hasta energías relativistas.

- a) Explicar brevemente cómo opera el mecanismo de reconexión magnética y cómo se aceleran partículas mediante el mismo.

- b) Derivar la tasa de reconexión para el caso simple del modelo de Sweet-Parker. ¿Puede operar eficientemente este mecanismo en escenarios astrofísicos con la geometría supuesta?
- c) Relacionar el modelo de reconexión magnética turbulenta con los resultados del inciso anterior. ¿Cómo es la eficiencia del proceso en este caso?
- d) ¿Cómo afecta la intensidad del campo magnético a la energía disponible para acelerar partículas? ¿Y a la eficiencia del proceso?

**Bibliografía sugerida para los Problemas 3–6:** Protheroe R. J. 1999, “Acceleration and interaction of ultra high energy cosmic rays”, arXiv:astro-ph/9812055 ([http://astrofrelat.fcaglp.unlp.edu.ar/astrofisica/media/Papers/Protheroe\\_1999.pdf](http://astrofrelat.fcaglp.unlp.edu.ar/astrofisica/media/Papers/Protheroe_1999.pdf)); Longair M. S., “High-Energy Astrophysics”, Cambridge University Press; Gaisser T. K., “Cosmic Rays and Particle Physics”, Cambridge University Press.

**Bibliografía sugerida para el Problema 5a:** Platzeck Ana María, apunte del curso de *Introducción a la Magnetohidrodinámica*, Capítulo VII, FCAG-UNLP (accesible en [http://astrofrelat.fcaglp.unlp.edu.ar/astrofisica/media/Papers/Intro\\_MHD.pdf](http://astrofrelat.fcaglp.unlp.edu.ar/astrofisica/media/Papers/Intro_MHD.pdf), páginas 217–227 del pdf).

**Bibliografía sugerida para el Problema 7:** Platzeck Ana María, apunte del curso de *Introducción a la Magnetohidrodinámica*, Capítulo VIII, FCAG-UNLP (accesible en [http://astrofrelat.fcaglp.unlp.edu.ar/astrofisica/media/Papers/Intro\\_MHD.pdf](http://astrofrelat.fcaglp.unlp.edu.ar/astrofisica/media/Papers/Intro_MHD.pdf), páginas 249–267 del pdf).