

Efecto de las variaciones de la presión térmica sobre el estado del gas interestelar

Mariana Mehrer Terradillos¹, Antonio Parravano²

¹Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología.
Universidad de Carabobo, Naguanagua, Venezuela.
mehrerm@gmail.com

²Postgrado de Física Fundamental, Facultad de Ciencias,
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
parravan@ula.ve

Resumen

Se estudió el cambio del estado termoquímico del gas interestelar cuando es sometido a fluctuaciones periódicas de presión analizando las trayectorias evolutivas. Se calculó el trabajo hecho sobre el gas en una trayectoria cíclica y se determinó su dependencia con el período T de la presión. Para periodos de oscilación entre 10^3 y 10^8 años se varió periódicamente la presión durante 100 ciclos y se calculó el trabajo en cada ciclo, lo cual permitió analizar la capacidad que posee el gas interestelar para radiar la energía mecánica asociada al proceso de compresión y descompresión. Los resultados obtenidos indican que el gas neutro de la Galaxia es capaz de disipar la energía mecánica que las supernovas depositan en el gas. También se encontró un comportamiento caótico en el rango de periodos $T = [4,85 - 4,97]$ Maños, $[5,04 - 5,10]$ Maños y $[5,87 - 5,91]$ Maños.

Abstract

We study the evolution of the thermo-chemical state of the interstellar gas subject to periodic fluctuations of pressure with period T . Analyzing the evolutives trajectories we calculate the work done on the gas by the external pressure in a cycle and found its dependence with \square in the range $10^3 < \square T < 10^8$ yr. The results indicate that the neutral gas in the Galaxy is able to dissipate the mechanical energy injected by SNe. We also observe that the work per cycle display a chaotic behavior for periods in the ranges $[4,85 - 4,97]$ Myrs, $[5,04 - 5,10]$ Myrs y $[5,87 - 5,91]$ Myrs.

1. Introducción

En las galaxias espirales ocurren procesos cíclicos en los cuales las estrellas eyectan gas y polvo al Medio Interestelar (ISM, Interstellar Medium en inglés) y a su vez este polvo y gas colapsa gravitacionalmente formando estrellas. Anteriormente se creía que el ISM era un lugar tranquilo con nubes interestelares, donde gradualmente se formaban las estrellas. Sin embargo, luego se descubrió un medio internobular caliente ($T \approx 10^6$ K) causado por la expulsión violenta de material estelar procedentes de supernovas y que produce ondas de choque que se propagan a través del ISM [McKee y Ostriker, (1977)], quedando claro que el ISM no es un lugar tranquilo. Ahora se sabe que no solo las supernovas tienen un rol importante en la actividad del ISM, sino que también existe una interacción de los fotones del ultravioleta provenientes de estrellas masivas de la galaxia con el medio, que poseen una energía de $6eV < hv < 13,6 eV$ [Parravano, (1988), Parravano (1989), Parravano y Mantilla, (1991). Parravano y Pech, (1997), Wolfire, McKee, Hollenbach y Tielens, (2003)].

2. Ecuaciones de evolución

La evolución del estado termoquímico se puede obtener integrando el sistema de ecuaciones

$$dT/dt = B(T)X/A(\xi) + [C(T, \xi, P)/A(\xi)] dP/dt - C(T, \xi, P)[A - \Gamma]/A(\xi), \quad (1)$$

$$d\xi/dt = -X, \quad (2)$$

donde T es la temperatura, $P = P_0 e^{(A \sin(\omega t))}$ la presión, $\xi = n_{HI} / n_H$ es la fracción de ionización del hidrógeno, $A(\xi) = 5R/2\mu(\xi)$, $B(T) = 5RT/2b$, $C(T, \xi, P) = RT/P \mu(\xi)$, Γ es la pérdida de energía por unidad de volumen, la ganancia de energía por unidad de volumen y $X = X^+ - X^-$, donde X^+ es la tasa neta de recombinaciones y X^- la tasa neta de ionizaciones [Parravano, (1987)].

En este trabajo se considera que el gas interestelar se enfría por: excitación por colisión de C^+ , Si^+ , Fe^+ , O^+ y S^+ con electrones, excitación por colisión de C^+ , Si^+ y Fe^+ con hidrógeno neutro [Dalgarno y McCray, (1972)]. y excitación Ly α [Penston, (1970)]. Que se calienta por: formación de H_2 sobre granos [Field, Goldsmith y Habing (1978), Tielens y Hollenback, (1999)], por rayos cósmicos [Spitzer, (1978)] y por los fotoelectrones provenientes de los granos de polvo

[Parravano, (1987)]. Se asume que el gas se ioniza por: rayos cosmicos, impacto de H con electrones y por fotoionización; y se considera la recombinación al estado base (N=1) separadamente a las demás recombinaciones (N≥2) [Parravano, (1987)]. Cuando la presión varía, el gas sufre un cambio de su volumen específico y en general su estado no está en equilibrio termoquímico. Por lo tanto se produce un intercambio de energía por radiación entre la parcela de simulación y el medio externo. Además, el medio externo proporciona (o toma) energía mecánica al comprimir (expandir) el gas en la parcela de simulación. El trabajo hecho sobre el volumen específico v , cuando este cambia una cantidad dv , es $-Pdv$ y por lo tanto, sobre una trayectoria evolutiva el trabajo realizado por unidad de masa es $w = -\int Pdv$ [erg/gr]. Dado que $P(t)$ es una función cíclica de período $\tau = 2\pi / \omega$, el trabajo realizado por átomo de hidrógeno en un ciclo es $w_o = \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{P(t)}{n^2} \frac{dn}{dt} dt$ [erg/H] el cual depende del período T y del estado del gas en el tiempo t_0 .

3. Resultados.

En la figura 1 se muestran dos curvas, la curva punteada describe la trayectoria evolutiva cuando el gas interestelar se somete a presión variable, la presión inicial es $P_0 / k = 10^{2,85} [Kcm^{-3}]$, la amplitud

$A = \frac{0,95}{\log_{10}(e)}$ y el periodo $\tau = 7$ [Maños]. La curva continua indica los estados de equilibrio

termoquímico. Debido al efecto de la inercia de ionización, el trabajo w_o realizado sobre el gas en el primer ciclo no necesariamente coincide con el trabajo w_o en ciclos sucesivos, ya que las condiciones al inicio de cada ciclo pueden ser diferentes. Para considerar este efecto se hacen simulaciones durante 100 ciclos, es decir, se comprime y descomprime el gas interestelar 100 veces y se calcula el trabajo en cada ciclo. El trabajo $w_o(n_c)$ realizado en el ciclo n_c puede alcanzar un estado asintótico o puede mostrar un comportamiento más complejo. La figura 2 muestra la dependencia de w_o en función del periodo τ , donde para cada valor del periodo se han superpuesto los valores de $w_o(n_c)$ para $50 \leq n_c \leq 100$. Al graficar con mayor detalle los valores del trabajo, se encuentra que para periodos $\tau < 4,67$ _ $< 4,67$ Maños, $w_o(n_c)$ es estacionario, al ir aumentando el

periodo los valores del trabajo oscilan con periodo dos luego con periodo cuatro hasta llegar a una zona de caos en el rango [4,85 – 5,10] Maños con algunas pequeñas ventanas periódicas en su interior. Entre 5,10 Maños y 5,87 Maños hay una ventana de periodo 3 y finalmente entre 5,87 Maños y 5,91 Maños hay una pequeña región caótica (ver figuras 3 y 4), luego el trabajo oscila en dos valores hasta alcanzar valores cuasi estacionarios. El ISM en la Galaxia frecuentemente es comprimido por explosiones de supernova (SN), por el paso por los brazos espirales de la Galaxia, por vientos estelares, etc. Sin embargo, la mayor fuente de ondas de choques en la Galaxia es la de la explosión de supernovas. La energía total de una explosión de supernova es del orden de 10^{51} erg. Aproximadamente un 30% de esta energía es inyectado al medio en forma de energía mecánica, mientras que el resto es radiado. En promedio explota una supernova cada 50 años en la Galaxia. Una estimación de la relevancia del mecanismo estudiado en la disipación de la energía mecánica inyectada por las supernovas es dada a continuación. La tasa media de inyección de energía mecánica en toda la Galaxia es $P_{SN} = E_0 / \tau_{SN}$ [erg/año], donde $E_0 = 0,3 \times 10^{51}$ [erg] (el 30% de la energía total de la explosión de una SN) es la energía promedio inyectada por cada SN y $\tau_{SN} \approx 50$ años es el tiempo medio transcurrido entre dos SN en la Galaxia. Por otra parte, la tasa de disipación de energía mecánica por el gas neutro de la Galaxia es $P_g = \frac{w_0 M_{gas}}{\pi m_H}$ [erg/año] donde w_0 es la energía disipada por átomo de hidrógeno en un ciclo de compresión-descompresión, τ es el periodo, $M_{gas} \approx 4 \times 10^9 M_{sol}$ es la masa de gas en el disco galáctico en masas solares ($M_{gas} \approx 2 \times 10^{33}$ [gr]) y $m_H = 1,67 \times 10^{-24}$ [gr] es la masa de un átomo de hidrógeno. Los resultados en la figura 2 muestran que para $T \leq 10$ Maños la razón $w_0 / \tau \approx 10^{-18}$ [erg/(H año)], de donde

$$P_g = \frac{w_0 M_{gas}}{m_H \tau} = \frac{10^{-18} (4 \times 10^9) (2 \times 10^{33})}{1,67 \times 10^{-24}} = 4,8 \times 10^{48} \text{ [erg/año]}, \quad \text{si} \quad P_g = P_{SN}, \quad \text{entonces}$$

$$\tau_{SN} = \frac{E_0}{P_g} = \frac{3 \times 10^{50}}{4,8 \times 10^{48}} = 62,5 \text{ años, valor comprendido en el rango aceptado } 50 < \tau_{SN} < 75 \text{ años.}$$

Esta estimación indica que el proceso estudiado puede ser el mecanismo dominante de disipación de

energía mecánica inyectada al medio interestelar por las SN.

4. Conclusiones

Se examinó la evolución del estado termoquímico del gas interestelar sujeto a variaciones periódicas de presión con condiciones iniciales en equilibrio. Se observó que las variaciones de presión rompen el equilibrio termoquímico y provocan que el gas siga trayectorias evolutivas en el plano P/k vs. $1/n$ que son muy sensibles al periodo de oscilación. Al estudiar las trayectorias evolutivas, se observó que la transición de fase hacia la fase fría ocurre a partir de $\tau = 4,67$ Maños, ya que el gas interestelar tiene tiempo para enfriarse lo suficiente ($T \approx 20K$). Se calculó el trabajo hecho sobre el gas en las trayectorias evolutivas cíclicas y se determinó su dependencia en el periodo τ . Se encontró que el máximo valor para el trabajo w_0 se alcanza cuando el periodo es $\tau \approx 14,6$ Maños, también se encontró que en los rangos $\tau = [4,67 - 8,5]$ Maños existen zonas donde el valor del trabajo oscila con periodicidad variable y en otras zonas se observan comportamientos caóticos ($[4,85 - 4,97]$ Maños, $[5,04 - 5,10]$ Maños y $[5,87 - 5,91]$ Maños). Finalmente, se encontró que el proceso estudiado es capaz de radiar la energía mecánica eyectada por la explosión de una supernova en nuestra Galaxia.

Agradecimientos

A. P. agradece al CDCHT de la Universidad de Los Andes por su apoyo a través del proyecto C-1271-04-05-A.

Referencias

- C. McKee, J. Ostriker, (1977). *Astrophysical Journal*, 218:148-169
- A. Parravano, (1988). *Astronomy & Astrophysics*. 205,71
- A. Parravano, (1989). *Astronomy & Astrophysics*. 347,812
- A. Parravano, Mantilla, (1991). *Astronomy & Astrophysics*. 250,70
- A. Parravano, C. Pech, (1997). *Astronomy & Astrophysics* 327, 1262-1270
- M. Wolfire, K. McKee, D Hollenbach y A. Tielens, (2003). *Astrophysical Journal* 587:278-311
- A. Dalgarno y R. McCray, (1972). *Astronomy & Astrophysics*. 10:375D

A. Tielens y D. Hollenback, (1999). Reviews of Modern Physics , Vol. 71, No. 1

A. Parravano, (1987). Astronomy & Astrophysics. 172, 280-292

L. Spitzer, (1978). "Physical processes in the Interstellar Medium" . Wiley, New York

M. V. Penston, (1970). The Astrophysical Journal, 162:771-781.

Field G.B., Goldsmith D. y Habing H, (1978). The Astrophysical Journal, 155: L149

Figura 1: Trayectoria evolutiva de la parcela de simulación en el plano (P/k, 1/n) (curva punteada).

Como referencia se muestra la curva de equilibrio termoquímico (curva continua).

Figura 2: Valores del trabajo w_0 vs. τ .

Figura 3: Valores del trabajo w_0 vs. τ , con $4,5 \text{ Maños} < \tau < 5,2 \text{ Maños}$.

Figura 4: Valores del trabajo w_0 vs. τ con $5,2 \text{ Maños} < \tau < 8,3 \text{ Maños}$

Figura 1

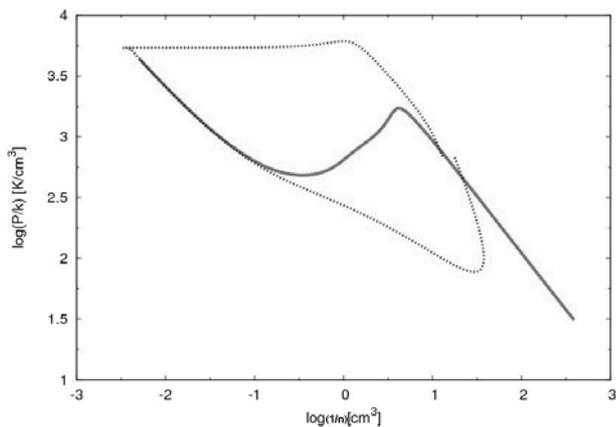


Figura 2

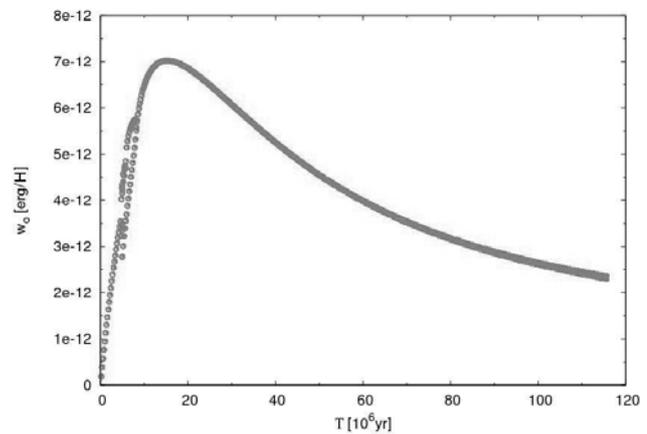


Figura 3

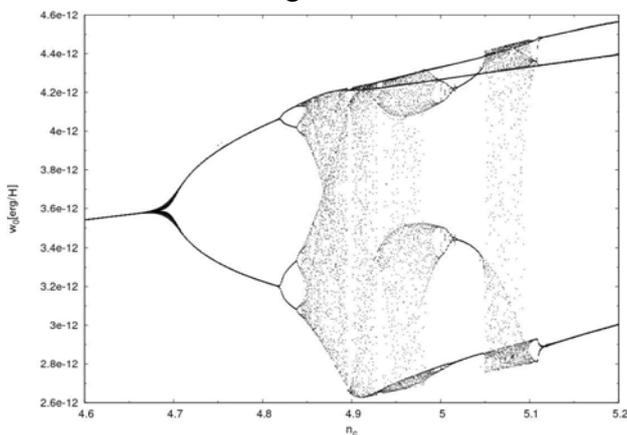


Figura 4

