

МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОСТ-АДІАБАТИЧНИХ ЗАЛИШКІВ НАДНОВИХ ЗІР

Тарас Кузьо¹, Василь Бешлей², Олег Петрук²

Львівський національний університет імені Івана Франка, kuzyo.taras@gmail.com
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАНУ

Еволюція адіабатичних залишків наднових зір (ЗН) добре описується аналітичними розв'язками системи рівнянь для сильного точкового вибуху, які отримані Сєдовим у 1946 р. [1]. З часом, під час сповільнення ударної хвилі, адіабатичність системи порушується через зростання радіаційних втрат. Вони стають суттєвими, коли температура на фронті спадає до значень нижче 10 млн. К. Енергетичні втрати зумовлюють суттєву перебудову характеристик течії: температура і тиск за фронтом ударної хвилі падають, що призводить до формування тонкої щільної оболонки. Як результат такої перебудови, залишок переходить у радіаційну стадію, для опису якої також існують аналітичні розв'язки [2]. Час, протягом якого відбувається така перебудова, не є малим, як це часто вважають у моделях ЗН, а є порівняним з тривалістю адіабатичної стадії [5].

Магнітне поле не впливає на динаміку течії на адіабатичній стадії, оскільки густина теплової енергії плазми в цих об'єктах значно перевищує густину енергії поля. Радіаційні втрати призводять до формування щільної оболонки, що зумовлює також зростання енергії магнітного поля в областях розривів. Відтак, воно повинно поступово ставати суттєвим фактором у динаміці залишків наднових зір. До прикладу, магнітне поле мало б послабити фактор компресії газу в оболонці, який у чисто гідродинамічних моделях досягає значень 1000 [3].

Математично така задача описується класичною системою рівнянь магнітної гідродинаміки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v \\ E \\ B \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v v \\ vE + vp_t - B(B \cdot v) \\ vB - Bv \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\nabla p_t \\ L \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

де повний тиск $p_t = p + B^2/2$, а радіаційні втрати визначаються як $L = n_e n_H \Lambda(T)$; $\Lambda(T)$ описує радіаційні втрати, які є сумою вкладів різних процесів випромінювання, що мають місце у космічній плазмі. Система
<http://www.iapmm.lviv.ua/chyt2015>

Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2015», 26–28 травня 2015 р., Львів

рівнянь доповнюється рівнянням стану ідеального газу, яке пов'язує між собою тиск і енергію E .

Ми використали магнітогідродинамічний код PLUTO [4] для розв'язування системи рівнянь (1). Чисельне інтегрування системи здійснюється за допомогою формалізму скінченних об'ємів, де усереднені по об'єму величини еволюціонують в часі. Цей підхід дає змогу розв'язувати систему вказаних рівнянь в інтегральній формі. Таким чином, чисельні алгоритми дозволяють коректно відобразити гідродинамічні течії з сильними градієнтами та розривами, які виникають у нашій задачі.

Нами отримано результати для різних значень напруженості зовнішнього магнітного поля та його орієнтації (паралельно та перпендикулярно до напрямку руху ударної хвилі). Як і очікувалося, паралельне магнітне поле не впливає на розподіли гідродинамічних параметрів, проте у випадку перпендикулярного поля спостерігається значне послаблення компресії газу, яке стає більш істотним із зростом величини напруженості магнітного поля.

1. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике – Москва: Наука. –1977. – 438 с.
2. *Bandiera R., Petruk O.* Analytic solutions for the evolution of radiative supernova remnants // *A&A.* – 2004. – 419. – P. 419-423.
3. *Blondin J., Wright E., Borkowski K., Reynolds S.* Transition to the radiative phase in supernova remnants // *Aph. J.* – 1998 –500. – P. 342-354.
4. *Mignone A., Bodo G., Massaglia S., et al.* PLUTO: a numerical code for computational astrophysics // *Ap. J. S.* – 2007. – 170. – 228.
5. *Petruk O.* On the transition of the adiabatic supernova remnant to the Radiative Stage in a Nonuniform Interstellar Medium // *J. Physical Studies.* – 2005. – 9, N 4. – P. 364-373.

MAGNETOHYDRODYNAMIC MODELLING OF THE POST-ADIABATIC SUPERNOVA REMNANTS

The transition of the adiabatic supernova remnants (SNR) to the radiative stage takes considerable amount of time that is compatible with the adiabatic stage itself. Thus one has to pay special attention to the post-adiabatic stage in order to properly model the SNR evolution. Due to the computational complexity of the problem we used PLUTO code to get the numerical solutions of the conservation-law system of differential equations describing it. The solutions for the various strengths of the parallel and perpendicular magnetic field are obtained. It is showed that the perpendicular magnetic field essentially suppresses the density gradients behind the shock.