

## **ПОСТ-АДІАБАТИЧНІ ЗАЛИШКИ НАДНОВИХ ЗІР У НЕОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА НЕОДНОРІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ**

**Тарас Кузьо, Олег Петрук**

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача,  
kuzyo.taras@gmail.com

Ефективна генерація гамма-променів, що мають адронну природу, у космічному середовищі відбувається у системах з відносно високим магнітним полем та високою густиною протонів-мішеней, з якими стикаються релятивістські протони, прискорені на ударних хвилях залишків наднових зір (ЗН). Такі умови виникають, коли ударна хвиля проходить через молекулярні хмари а, отже, ЗН, які розташовані поблизу молекулярних хмар, є перспективними об'єктами для спостережень адронних гамма-променів [1].

Ударна хвиля ЗН сповільнюється при взаємодії з молекулярною хмарою, через ріст густини середовища. Як наслідок, температура плазми за течією спадає, і суттєвими стають радіаційні втрати. Ударна хвиля поступово переходить з адіабатичної стадії у радіаційну [2]. При цьому суттєво змінюються фізика ударної хвилі та умови для прискорення часток на ній.

Еволюція ЗН на пост-адіабатичній стадії супроводжується зростанням ролі радіаційних втрат плазми за рахунок її охолодження, а також суттєвою зміною структури течії за фронтом ударної хвилі. В областях, розташованих відразу за фронтом ударної хвилі, формуються регіони з високими густиною і напруженістю магнітного поля. Очікується, що така перебудова течії повинна сприяти суттєвому росту ефективності адронних гамма-променів. Таким чином, пост-адіабатичні ЗН можуть бути джерелами адронного випромінювання.

Математично така задача описується класичною системою рівнянь магнітної гідродинаміки з доданком, який відповідає за енергетичні втрати при радіаційному охолодженні. Для її розв'язування у роботі використано магнітогідродинамічний код PLUTO [3].

Результати досліджень для випадку однорідного середовища та однорідного магнітного поля, а також основні властивості пост-адіабатичних ударних хвиль у магнітному полі наведено у [4]. Розподіл густини у реальних молекулярних хмарах є неоднорідним. Його можна змодельовати простою експоненційною функцією з певним масштабом неоднорідності. Подібним

## **Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2016», 25–27 травня 2016 р., Львів**

способом описується і неоднорідне магнітне поле. У цій роботі ми досліджуємо вплив таких неоднорідностей на перебіг пост-адиабатичної стадії еволюції ЗН, особливості параметрів течії та конфігурації магнітного поля всередині залишку. Моделювання проводилося для різних значень масштабу неоднорідностей та напруженостей магнітного поля. У [4] встановлено, що гідродинамічні параметри не зазнають змін при наявності паралельного магнітного поля, тому основну частину результатів отримано для його перпендикулярної орієнтації.

1. *Slane P., Bykov A., Ellison D., Dubner G., Castro D.* Supernova Remnants Interacting with Molecular Clouds: X-Ray and Gamma-Ray Signatures // *Space Science Reviews*. 2015. – Vol. 188, Issue 1-4. – P. 187-210.
2. *Blondin J., Wright E., Borkowski K., Reynolds S.* Transition to the radiative phase in supernova remnants // *Aph. J.* – 1998 –500. – P. 342-354.
3. *Mignone A., Bodo G., Massaglia S., et al.* PLUTO: a numerical code for computational astrophysics // *Ap. J. S.* – 2007. – 170. – 228.
4. *Petruk O., Kuzyo T., Beshley V.* Post-adiabatic supernova remnants in an interstellar magnetic field: parallel and perpendicular shocks // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2016. – Vol. 456, Issue 3. P. 2343-2353.

### **POST-ADIABATIC SUPERNOVA REMNANTS IN THE NON-UNIFORM MEDIUM AND NON-UNIFORM MAGNETIC FIELD**

*The efficient generation of hadronic gamma-rays in the space universe is possible in the systems with relatively high magnetic field strength and a high density of target protons that are hit by relativistic protons accelerated in shock waves from supernova remnants (SNR). The SNR evolution on the post-adiabatic stage is accompanied by the increasing role of the plasma radiative losses and the significant change of the flow structure behind the shock. It is expected that such a flow transformation will result in the significant rise of the efficiency of hadronic gamma-rays generation. From the mathematical point of view, this problem is governed by the system of classic magnetohydrodynamic equations with the radiative cooling term representing energy losses. We make use of PLUTO MHD code for solving the system. We model the non-uniformity both of number density and magnetic field with a simple exponential distribution. We study the dependence of the blast wave properties on the non-uniformity scale and magnetic field strength.*