

Nr umowy: 2019/33/B/ST9/02569

Tytuł: Fale uderzeniowe jako źródła wysokoenergetycznych cząstek

Cel projektu

Pochodzenie cząstek wysokich energii stanowi od dawna nierozwiązany problem w astrofizyce. Celem projektu jest badanie procesów, które prowadzą do przyspieszania naładowanych cząstek i generacji turbulencji elektromagnetycznej w falach uderzeniowych w plazmie kosmicznej. Badane będą nierelatywistyczne i relatywistyczne szoki astrofizyczne z zastosowaniem m.in. do fal uderzeniowych w łączących się gromadach galaktyk, dżetów aktywnych jąder galaktyk i błysków gamma. Obiekty te są źródłem silnej nietermicznej emisji promieniowania elektromagnetycznego, sięgającej zakresem do wysokoenergetycznych promieni X i gamma. Prawdopodobnie są również źródłami wysokoenergetycznych neutronów i promieni kosmicznych najwyższych energii.

W ramach projektu badane będą procesy przyspieszania cząstek na poziomie kinetycznym w dwóch odrębnych i słabo zbadanych reżimach parametrów fal uderzeniowych i plazmy ośrodka. Badania nierelatywistycznych szoków o małej liczbie Macha w ośrodku z wysoką betaplazmową mają zastosowanie do fal uderzeniowych w gromadach galaktyk i rozbłyskach słonecznych. W tym reżimie nacisk położony będzie na fizykę wstrzykiwania elektronów do procesów dyfuzyjnego przyspieszania na szoku, chociaż zbadane zostaną również istotne aspekty połączonej preakceleracji elektronów i jonów, a także procesy generowania turbulencji elektromagnetycznej towarzyszącej produkcji wysokoenergetycznych cząstek. Relatywistyczne fale uderzeniowe w zmagetyzowanej plazmie dżetów aktywnych galaktyk i błysków gamma będą badane głównie w kontekście generacji promieni kosmicznych najwyższych energii poprzez przyspieszanie w oddziaływaniach z falami elektromagnetycznymi o dużej amplitudzie. Omówione zostaną również powiązane problemy istotne dla tych układów, takie jak sprzężenie elektronowo-protonowe. Główną metodą badawczą stosowaną w tym projekcie jest numeryczne modelowanie zjawisk plazmowych z użyciem nowoczesnej techniki symulacji typu cząstka w komórce (PIC; Particle-in-Cell). Symulacje PIC oferują w pełni spójny opis bezzderzeniowej plazmy. Za pomocą tego narzędzia można śledzić ewolucję układów do silnie nieliniowych faz. Zarówno rozwój algorytmów, jak i sprzętu komputerowego pozwoliły w ostatnich latach dojrzeć technice PIC i stać się instrumentem, za pomocą którego przeprowadzamy dziś szczegółowe eksperymenty komputerowe procesów zachodzących w plazmie astrofizycznej i laboratoryjnej. Symulacje PIC już teraz mogą pochwalić się znaczącymi osiągnięciami w astrofizyce wysokich energii. Posiadają one bardzo dobre perspektywy dostarczenia jeszcze ważniejszych wyników naukowych w przyszłości. Symulacje będą wykonywane na superkomputerach o dużej mocy obliczeniowej, przy użyciu zaawansowanych wysokowydajnych masowo równoległych kodów numerycznych. Zastosowane tutaj podejście kinetyczne umożliwi zrozumienie procesów zachodzących na skalach

mikroskopowych w kosmicznych szokach, bez przybliżeń stosowanych w symulacjach MHD, hybrydowych czy Monte Carlo.

Struktura makroskopowa astrofizycznych fal uderzeniowych jest kształtowana przez cząstki nietermiczne, których przyspieszaniem i transportem rządzą procesy zachodzące na najmniejszych skalach plazmowych, jakim są oscylacje elektronów. Dlatego badanie mikroskopowych procesów plazmowych ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia fizyki obiektów astronomicznych, w których występują szoki bezzderzeniowe. Do tego celu doskonale nadaje się metoda symulacji kinetycznych PIC. Daje ona perspektywę osiągnięcia rzeczywistego postępu w rozwiązywaniu nierozstrzygniętych zagadnień. Jednym z nich jest mechanizm przyspieszania cząstek do wysokich energii. W nowo narodzonej epoce astrofizyki wielu nośników informacji potrzeba odpowiedzi na to pytanie nigdy nie była bardziej paląca. Wraz z ogromnym wzrostem mocy obliczeniowej w ostatnich latach niektóre odpowiedzi są już dostępne. Projekt przyniesie dalszy rozwój kodów PIC w Polsce, a poprzez powołanie nowego zespołu badawczego poszerzy on również wiedzę z zakresu astrofizyki plazmy w naszym kraju. To przygotowuje nas na zbliżającą się erę obliczeń w skali exa.