

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005028774

Coordinatore Scientifico	Attilio FERRARI
Ateneo	Università degli Studi di TORINO
Titolo della Ricerca	Processi collettivi nonlineari in astrofisica delle alte energie: modelli numerici e loro verifica sperimentale in laboratorio
Finanziamento assegnato	Euro 41.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Il progetto ha come obiettivo la convalida di codici numerici utilizzati per simulazioni di dischi di accrescimento e getti astrofisici da stelle e nuclei galattici mediante un confronto con esperimenti di laboratorio. Inoltre, per estendere il dominio di validità delle simulazioni numeriche, si implementeranno nei codici di simulazione modelli sottogriglia (Large Eddy Simulations, LES). Infine, si svilupperanno strumenti per la comprensione dei fenomeni astrofisici attraverso il confronto incrociato di simulazioni numeriche dirette, esperimenti di laboratorio e modelli sottogriglia.

La realizzazione in laboratorio di situazioni analoghe a sistemi astrofisici permetteranno di migliorare l'intuizione fisica relativa ai processi che governano i fenomeni in esame, anche se i parametri di controllo possono essere molto diversi da quelli che si hanno nella situazione astrofisica reale. Inoltre i modelli LES, convalidati dal confronto tra simulazioni numeriche dirette ed esperimenti, permettono di valutare l'applicabilità delle simulazioni numeriche verso regimi vicini alla situazione astrofisica. Intendiamo applicare la metodologia ai casi specifici dei dischi di accrescimento e getti astrofisici.

La dinamica dei getti è determinata principalmente dalla formazione di strutture di urti, dalla generazione di turbolenza con i conseguenti processi di mescolamento con il materiale esterno e di trascinamento di questo materiale e dalla interazione tra urti e turbolenza. I numeri di Reynolds tipici delle situazioni astrofisiche sono enormi e non riproducibili in simulazioni numeriche dirette. Un esperimento di laboratorio sulla propagazione dei getti è stato realizzato dal gruppo e viene condotto al Politecnico di Milano. Dei tre parametri di controllo principali, il numero di Mach, il rapporto di densità tra getto e mezzo esterno e il numero di Reynolds, gli intervalli di numero di Mach e di rapporto di densità realizzabili in laboratorio sono in accordo con la controparte astrofisica. Al contrario i numeri di Reynolds dell'esperimento non possono essere simili ai numeri di Reynolds dei getti astrofisici e cadono nell'intervallo 10^3 - 10^4 , che può essere raggiunto nel limite inferiore dalle simulazioni numeriche dirette.

Per quanto riguarda i dischi astrofisici abbiamo studiato la dinamica di vortici e onde in relazione al problema del trasporto di momento in dischi kepleriani, fenomeni associati alla produzione di getti in regioni di formazione stellare e nei nuclei galattici attivi. Intendiamo ora estendere i modelli con l'inclusione del campo magnetico e utilizzando ancora la tecnica sottogriglia. Il processo di convalida dei codici in questo ambito sarà condotto attraverso un confronto con gli esperimenti sviluppati nel contesto della collaborazione tra i ricercatori del nostro gruppo con il Center for Magnetic Self-Organization della National Science Foundation presso il Plasma Physics Laboratory di Princeton e il Los Alamos National Laboratory.

Il programma di ricerca richiede una stretta collaborazione fra le due unità di ricerca che possiedono competenze in aree diverse e complementari e il Center for Magnetic Self-Organization. Più precisamente l'unità di ricerca all'Università di Torino composta da ricercatori dell'Università di Torino e dell'INAF Osservatorio Astronomico di Torino hanno competenze nelle simulazioni di flussi astrofisici e nello sviluppo di codici numerici per tali simulazioni. La seconda unità di ricerca composta da ricercatori dei Politecnici di Torino e Milano possiede una specifica competenza sulla parte sperimentale e sulla costruzione di modelli sottogriglia per la turbolenza fluidodinamica al fine di condurre simulazioni di tipo LES.

Per quanto riguarda l'esperimento di laboratorio al Politecnico di Milano, già attivo, attualmente permette di studiare getti sottoespansi fino a scale di circa 200 diametri iniziali del getto. I numeri di Mach iniziali raggiunti sono dell'ordine di 50. Il getto ed il mezzo esterno possono essere composti di gas diversi e in questo modo il rapporto di densità tra getto e mezzo esterno può essere variato tra 0.2 e 40. I getti sono quasi stazionari e sono caratterizzati da un urto a barile e da un disco di Mach vicino al punto di iniezione. La diagnostica è ottenuta con un fascio di elettroni che permette di visualizzare una qualsiasi sezione piana del getto. In questo modo è possibile ottenere mappe di densità e di concentrazione dei due diversi gas lungo queste sezioni. Le mappe di concentrazione permettono di ottenere informazioni sul mescolamento tra getto e mezzo esterno nel regime comprimibile. La visualizzazione e le misure di densità sono allo stato dell'arte internazionale, mentre le misure di concentrazione basate sul colore delle immagini sono un risultato originale e rappresentano un'effettiva innovazione nelle tecniche di misura. Le fasi sperimentali del progetto consistono nell'installazione di un ugello di De Laval per generare getti in equilibrio di pressione. Gli ugelli per produrre getti con numeri di Mach 5, 10, 15 e 20 sono già stati progettati. E' anche necessario implementare un sistema più veloce per l'acquisizione delle immagini. Infatti i nuovi getti saranno generati in modo impulsivo e il tempo scala di generazione sarà dell'ordine di 1 ms. Questo richiede una camera veloce, capace di 2000 immagini al secondo, da attivare in maniera sincrona con la produzione del getto. Con una camera veloce ad alta sensibilità sarà anche possibile ottenere informazioni sul processo di mescolamento. E' anche previsto un miglioramento software per l'analisi delle sequenze di immagini.

Le simulazioni numeriche dirette degli esperimenti sono condotte utilizzando i codici PLUTO e FLASH disponibili al gruppo in un regime in cui i parametri adimensionali di controllo dell'esperimento (numero di Mach, rapporto di densità e numero di Reynolds) possono essere riprodotti dalle simulazioni. Per le DNS si utilizzeranno solutori già implementati nei codici, inoltre verranno implementati nuovi solutori ad alta risoluzione che saranno usati per il confronto. Il confronto tenderà a determinare il dominio di validità delle DNS, cioè i numeri di Reynolds che possono essere raggiunti ad una data risoluzione e forniranno una base da cui partire per il confronto con i risultati delle simulazioni LES che costituiranno il passo successivo del nostro progetto. Le DNS richiederanno elevata risoluzione se si vogliono raggiungere i numeri di Reynolds dell'esperimento di laboratorio. Il secondo passo del progetto prevede l'inclusione di modelli sottogriglia nei nostri codici al fine di condurre simulazioni di tipo LES. Questo passo richiederà una forte interazione tra le due unità di ricerca. Il gruppo ha sviluppato modelli sottogriglia per turbolenza disomogenea che devono essere implementati nei codici astrofisici (PLUTO e FLASH). A questo proposito un passo importante sarà lo sviluppo di un metodo automatico per inserire o eliminare i termini sottogriglia nelle simulazioni di tipo LES dei getti. Infatti questi termini devono essere attivi solo dove turbolenza e piccole scale sono generate, considerando funzionali dei campi a grande scala (tipicamente dei campi di velocità e vorticità). I valori di questi funzionali indicheranno localmente le regioni più ricche di piccole scale. Le simulazioni LES saranno analizzate attraverso un confronto con le DNS e con i risultati dell'esperimento di laboratorio.

L'obiettivo astrofisico finale sarà un'analisi dettagliata sulla fisica dei processi astrofisici, getti e dischi, e il confronto dei modelli con dati osservativi. La modellistica sarà sviluppata in condizioni non-relativistiche in quanto i dati osservativi con cui sarà confrontata non comportano velocità relativistiche, e anche i getti e dischi di laboratorio non raggiungono tali condizioni estreme.

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Le simulazioni numeriche sono divenute un importante strumento per lo studio dei fenomeni astrofisici, tuttavia lo spazio dei parametri che permettono di esplorare è generalmente abbastanza lontano da quello dei sistemi astrofisici. Più specificamente il numero di Reynolds e il numero di Reynolds magnetico dei sistemi astrofisici sono molto più elevati di quelli che possono essere raggiunti nelle simulazioni e gli intervalli di scale spaziali e temporali nella situazione astrofisica sono molto più estesi di quelli ottenibili nelle simulazioni. In questo contesto, esperimenti di laboratorio che riproducano situazioni e processi analoghi a quelli osservati nei fenomeni astrofisici possono giocare un importante ruolo in quanto si possono trovare in un intervallo di parametri riproducibili dalle simulazioni e quindi possono essere utilizzati per la convalida dei codici numerici usati nelle simulazioni, per assicurarsi che i codici numerici catturino in maniera corretta la fisica coinvolta nei fenomeni studiati.

Inoltre l'analisi delle simulazioni e degli esperimenti, anche se si trovano in un intervallo di parametri lontano dalla situazione astrofisica, aiuta a costruire l'intuizione fisica sui processi nonlineari che governano i fenomeni in esame. Un ruolo importante nelle simulazioni astrofisiche può essere giocato dalla modellizzazione sottogriglia, cioè dalla modellizzazione degli effetti delle scale che si trovano al di sotto della risoluzione. Questa modellizzazione permette di estendere lo spazio dei parametri coperto dalle simulazioni rendendolo più vicino alla controparte astrofisica. I modelli sottogriglia sono convalidati attraverso il confronto sia con le simulazioni numeriche dirette sia con gli esperimenti di laboratorio.

In questo progetto intendiamo applicare questa nuova metodologia allo studio della dinamica dei dischi e getti astrofisici. I getti astrofisici sono flussi supersonici, collimati che possono essere osservati in molti contesti che vanno dalle regioni di formazione stellare ai nuclei galattici attivi. Essi sono strettamente legati ai dischi di accrescimento dai quali si pensa vengano originati. La dinamica di tali oggetti è un attivo settore di studio in cui le simulazioni numeriche giocano un ruolo importante e molti problemi rimangono ancora aperti. Per quanto riguarda i getti, i problemi della stabilità e dell'interazione con il mezzo circostante sono fondamentali per la comprensione della loro fenomenologia. Nel caso dei getti da nuclei galattici attivi, il trascinamento turbolento di materiale esterno però è un meccanismo importante per determinare la morfologia del getto e della radiosorgente associata, originando la dicotomia tra radiosorgenti di bassa (FRI) e di alta potenza (FRII). Nel caso dei getti associati con oggetti stellari giovani, il trascinamento di materiale esterno può essere collegato alla formazione di flussi meno collimati osservati nelle righe molecolari (flussi molecolari). Per quanto riguarda i dischi di accrescimento, il processo chiave è il trasporto di momento angolare e, anche se a questo proposito l'instabilità magneto-rotazionale è stata individuata come un elemento molto importante, molte questioni rimangono ancora aperte. Inoltre altri meccanismi potrebbero essere rilevanti per il trasporto soprattutto nei limiti in cui il campo magnetico non gioca un ruolo importante nella dinamica oppure è relativamente intenso.

Il progetto mette insieme gruppi con forti competenze interdisciplinari e complementari, come richiesto dalla applicazione della metodologia sopra descritta, allo studio dei getti e dischi di accrescimento astrofisici attraverso l'utilizzo di simulazioni numeriche. La collaborazione tra questi gruppi ha anche prodotto l'ideazione e la realizzazione di un esperimento di laboratorio per lo studio della dinamica di getti ipersonici su medio-lungo termine. Le caratteristiche chiave originali dell'esperimento sono proprio la possibilità di studiare la dinamica su tempi medio-lunghi e la possibilità di variare i due parametri principali che determinano il comportamento dei getti astrofisici, cioè il numero di Mach e il rapporto di densità tra getto e mezzo ambiente. Con il progetto intendiamo completare la realizzazione della struttura di laboratorio installando il nuovo sistema di produzione del getto, che permetterà la realizzazione di getti a diversi numeri di Mach in equilibrio di pressione con l'ambiente, e migliorando inoltre il sistema di diagnostica e visualizzazione. Questo permetterà di ottenere una caratterizzazione sperimentale della dinamica del getto. Inoltre miglioreremo i nostri strumenti di simulazione numerica implementando schemi ad alta risoluzione più adatti allo studio dell'interazione tra urti e turbolenza, un elemento importante nella dinamica del getto.

La convalida dei codici utilizzati per la simulazione sarà ottenuta attraverso un confronto tra simulazioni numeriche dirette e risultati di laboratorio. Il confronto è possibile perché i valori più bassi di numero di Reynolds ottenibili in laboratorio si trovano in un intervallo raggiungibile da simulazioni ad alta risoluzione. L'intervallo di validità delle simulazioni potrà poi essere esteso conducendo simulazioni a grande scala (Large Eddy Simulations, LES) con modelli sottogriglia. In queste simulazioni viene calcolata unicamente la dinamica delle scale più grandi, mentre gli effetti delle piccole scale sono introdotti attraverso un modello. Naturalmente nelle simulazioni di getti la turbolenza è disomogenea e inoltre gli effetti delle piccole scale non sono sempre e

dovunque presenti, e' quindi necessario seguire una metodologia che permetta di trattare questi problemi. Modelli di sottogriglia per turbolenza disomogenea e metodi per rilevare la presenza di piccole scale, e quindi per inserire o eliminare i termini di sottogriglia, sono stati e saranno studiati dai proponenti. I modelli di sottogriglia saranno implementati nei nostri codici numerici e quindi i codici verranno utilizzati per condurre simulazioni di tipo LES. Queste simulazioni e i modelli utilizzati saranno convalidati attraverso il confronto con simulazioni numeriche dirette e con i risultati di laboratorio. Uno studio dettagliato della propagazione del getto e degli effetti di trascinarsi di materiale esterno sara' poi condotto con i codici LES in relazione alla situazione astrofisica.

In parallelo condurremo anche simulazioni numeriche dei processi di trasporto di momento angolare nei dischi di accrescimento, studiando in particolare il ruolo dei vortici e delle onde. Questa parte del progetto sara' condotta in collaborazione con il Center for Magnetic Self Organization in Laboratory and Astrophysical Plasmas (CMSO) della National Science Foundation, costituito negli Stati Uniti da alcuni gruppi guida in questo settore. Una parte dell'attivita' del centro riguarda la convalida di codici di simulazione attraverso il confronto con esperimenti di laboratorio e la collaborazione con il centro riguardera' sia la dinamica dei dischi di accrescimento sia la morfologia dei getti su grande scala.

Criteri di verificabilità

Il progetto si estende su 24 mesi e viene diviso in due fasi di circa 12 mesi ciascuna. Le milestones del progetto sono indicate nella seguente tabella e indicano i risultati che si prevede di ottenere alla conclusione delle fasi; i vari elementi debbono essere visti procedere in parallelo tra parte sperimentale e numerica con un confronto finale. Il raggiungimento dei risultati rappresenta il criterio di verificabilità del progetto.

PRIMA FASE:

- 1) Installazione di un ugello di De Laval nell'esperimento di laboratorio a Milano per produrre getti in equilibrio di pressione e miglioramento delle tecniche di diagnostica.
- 2) Caratterizzazione sperimentale delle proprietà dei getti di laboratorio a medio lungo termine.
- 3) Estensione dei solutori numerici disponibili ad accuratezze di ordine più elevato.
- 4) Simulazioni numeriche dirette e confronto con l'esperimento di laboratorio.
- 5) Sviluppo di sensori per la presenza di piccole scale e confronto con DNS di turbolenza omogenea.
- 6) Implementazione delle tecniche LES in PLUTO e FLASH.
- 7) Simulazioni di dischi e getti e confronto con esperimenti di laboratorio al CMSO.

SECONDA FASE:

- 1) Confronto dei risultati LES con gli esperimenti di laboratorio.
- 2) Studio della fisica del trascinarsi di materiale esterno e del trasporto trasversale di massa, momento, energia e traccianti passivo; applicazione ai getti astrofisici.
- 3) Applicazione delle simulazioni LES a oggetti astrofisici.
- 4) Simulazioni di dischi e getti e confronto con esperimenti di laboratorio al CMSO.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Università degli Studi di TORINO
Responsabile Scientifico	Attilio FERRARI
Finanziamento assegnato	Euro 16.000

Compito dell'Unità

Le attività sono divise in due periodi di circa 12 mesi ciascuna.

PRIMA FASE:

- 1) Estensione dei solutori del codice PLUTO a schemi di più elevata accuratezza spaziale.
- 2) Simulazioni numeriche dirette dell'esperimento di laboratorio a Milano e confronto con i risultati sperimentali.
- 3) Implementazione delle tecniche LES in PLUTO e FLASH anche con campi magnetici.
- 4) Simulazioni di dischi e getti astrofisici e confronto con gli esperimenti di laboratorio al CMSO.

SECONDA FASE:

- 1) Confronto tra i risultati delle simulazioni LES e l'esperimento di laboratorio a Milano.
- 2) Studio della fisica del trascinarsi di materiale esterno da parte dei getti e del trasporto laterale di massa, momento, energia.
- 3) Applicazioni delle simulazioni LES agli oggetti astrofisici.
- 4) Simulazioni di dischi e getti e confronto con gli esperimenti di laboratorio al CMSO.

Sede dell'Unità	Politecnico di TORINO
Responsabile Scientifico	Daniela TORDELLA
Finanziamento assegnato	Euro 25.000

Compito dell'Unità

Le attività sono divise in due periodi di circa 12 mesi ciascuna.

PRIMA FASE:

- 1) Installazione dell'ugello di De Laval nel laboratorio di Milano per la produzione di getti in equilibrio di pressione e miglioramento sistemi di visualizzazione.*
- 2) Caratterizzazione sperimentale della dinamica a medio-lungo termine del getto.*
- 3) Simulazioni numeriche dirette dell'esperimento di laboratorio e confronto con i risultati sperimentali.*
- 4) Sviluppo di sensori della generazione di piccola scala e confronto con risultati di simulazioni numeriche dirette di turbolenza omogenea.*
- 5) Implementazione delle tecniche LES in PLUTO e FLASH.*

SECONDA FASE

- 1) Confronto tra i risultati delle simulazioni LES e l'esperimento di laboratorio di Milano.*
 - 2) Studio della fisica del trascinamento di materiale esterno da parte del getto e del trasporto laterale di massa, momento, energia.*
-