



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

Dipartimento di  
Fisica e Astronomia

ASTROFISICA

ASAP – Arcetri Space & Astrophysical Plasmas



### I plasmi spaziali ed astrofisici

Il gruppo **ASAP - Arcetri Space & Astrophysical Plasmas** del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Firenze si prefigge di studiare i fenomeni fisici che stanno alla base di moltissimi processi riscontrabili in astrofisica. La quasi totalità della materia (visibile) dell'Universo, infatti, si presenta sotto forma di plasma, ovvero di gas totalmente o parzialmente ionizzato in cui la densità media di cariche libere presenti sia tale che prevalgano gli effetti elettrodinamici collettivi su grande scala piuttosto che gli urti fra le singole particelle. Esempi di stati di aggregazione di plasma in campo astrofisico sono molteplici: dagli interni e dalle atmosfere stellari, al mezzo interstellare o intergalattico; da vari tipi di nebulose come resti di supernove o regioni HII, ai flussi di materia collimati e non, sia stellari che galattici. In tutti questi casi le correnti ed i campi magnetici autogenerati giocano un ruolo fondamentale e spesso la geometria stessa del sistema è definita dalla struttura dei campi magnetici presenti in esso.

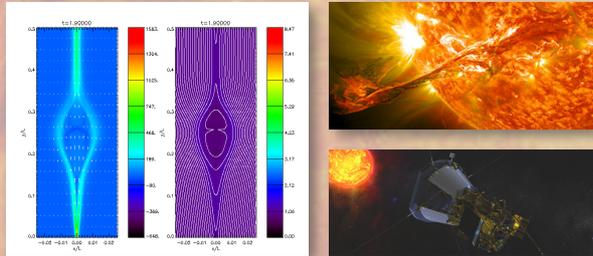
WEB: [www.astro.unifi.it/asap](http://www.astro.unifi.it/asap)



CONTATTI: **Luca Del Zanna** ([luca.delzanna@unifi.it](mailto:luca.delzanna@unifi.it)), **Simone Landi** ([simone.landi@unifi.it](mailto:simone.landi@unifi.it))

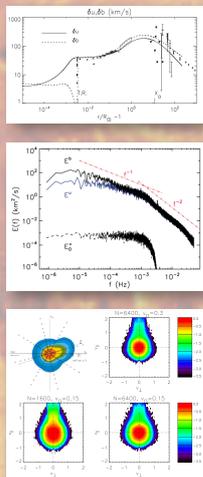
### Plasmi solari: riscaldamento coronale e riconnessione magnetica

L'atmosfera solare, in particolare la **corona**, è sicuramente l'ambiente astrofisico in cui l'importanza dei campi magnetici si manifesta nei modi più spettacolari. Specialmente in regime di massimo di attività solare la corona risulta fortemente dinamica e dominata da arcate magnetiche, protuberanze in continua eruzione (sotto un'immagine della sonda NASA SDO), e brillamenti su tutte le scale spaziali e temporali. La corona è un plasma tenue ma molto caldo, sull'ordine dei milioni di gradi, migliaia di volte più calda degli strati sottostanti. Questo comportamento anomalo si può probabilmente spiegare tramite il fenomeno della **riconnessione magnetica**, ovvero un improvviso cambio di topologia in cui linee magnetiche si spezzano e viene rilasciata una grande quantità di energia magnetica, poi convertita in energia termica e rilascio di particelle accelerate. Tramite simulazioni numeriche di **magnetoidrodinamica (MHD)** resistiva si possono spiegare molti aspetti di questo fenomeno (vedi figura sotto). Una risposta definitiva sull'origine del riscaldamento coronale verrà probabilmente data dalle sonde ESA **Solar Orbiter** e NASA **Solar Probe Plus** (qui in immagine artistica), a cui membri del nostro gruppo partecipano attivamente in collaborazione sia con il gruppo di fisica solare locale ([www.arcetri.inaf.it/ricerca/fisica-solare](http://www.arcetri.inaf.it/ricerca/fisica-solare)) sia con la NASA.



### Plasmi eliosferici: onde, turbolenza e particelle nel vento solare

La corona solare calda è una sorgente continua del **vento solare**, un flusso supersonico di plasma e particelle cariche che si propaga nello spazio fino alla Terra e nel resto dell'Eliosfera raggiungendo velocità di ~ 1000 km/s. Il vento solare rappresenta un fantastico **laboratorio** per la fisica del plasma, in quanto è l'unico ambiente astrofisico in cui le sonde possono misurare *in situ* i parametri fisici rilevanti. È stato scoperto che tale flusso è permeato da **onde MHD** che si propagano principalmente verso l'esterno e che presumibilmente contribuiscono alla sua accelerazione (vedi grafico in alto con un modello per le fluttuazioni di velocità e campo magnetico). Inoltre, si osserva uno spettro esteso di turbolenza, le cui proprietà evolvono con la distanza dal Sole, come mostrato in un modello teorico in figura. Quando la **cascata turbolenta** raggiunge le scale più piccole, sia nei tempi di evoluzione sia nello spazio, le fluttuazioni possono essere dissipate, probabilmente per **effetti cinetici**. A causa della sua bassa densità, il vento solare si trova infatti in un regime ibrido, per cui la trattazione fluida non è sempre soddisfacente. Ad esempio si osserva che sia gli ioni (protoni) sia gli elettroni presentano deviazioni dall'equilibrio termico, come code sopratermiche allungate nella direzione del campo magnetico locale (vedi la funzione di distribuzione elettronica da dati della sonda **HELIOS**, riportata in alto a sinistra nell'ultima figura). Si riescono a riprodurre queste osservazioni solo tramite simulazioni di tipo cinetico, in cui si possa tener conto appunto delle deviazioni rispetto alla velocità media fluida delle singole particelle.



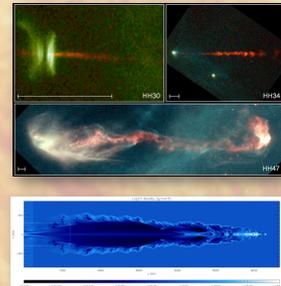
### Plasmi e indagine teorica: la simulazione numerica

Le equazioni che governano l'evoluzione dei plasmi sono estremamente complesse e fortemente nonlineari, per cui l'indagine teorica si sviluppa principalmente tramite le **simulazioni numeriche**. All'interno del nostro gruppo di ricerca vengono sviluppati e utilizzati vari **codici numerici**, sia di tipo fluido (regime MHD nel caso di plasmi magnetizzati), sia di tipo cinetico. Tali codici sono scritti per l'esecuzione su **supercomputer**, con migliaia di unità che lavorano in parallelo, per raggiungere un'elevata potenza di calcolo (in figura un cluster presso il **CINECA**).



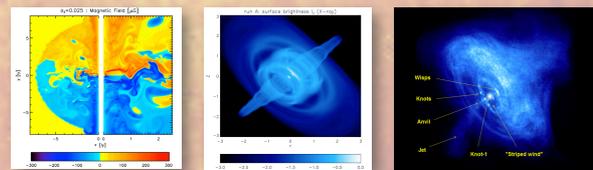
### Plasmi astrofisici: getti supersonici da stelle giovani

Nelle regioni di formazione stellare della nostra galassia si osservano spesso **getti di materia** altamente collimati provenienti da stelle giovani, in alcuni casi evidentemente associati a dischi di accrescimento (vedi le immagini di **Hubble** qui accanto). Tramite simulazioni numeriche di getti supersonici magnetizzati (in figura una mappa di densità in scala logaritmica) ed al confronto con le osservazioni (sono necessari anche modelli per l'emissione nelle varie righe spettrali) è possibile investigarne alcune proprietà, tra cui la forma del campo magnetico in prossimità del disco e l'eventuale velocità di rotazione del getto stesso. Per la simulazione numerica di tali getti supersonici è necessario usare tecniche capaci di trattare la formazione e la propagazione di onde d'urto, ovvero gli schemi **shock capturing**.



### Plasmi astrofisici relativistici: venti di pulsar e resti di supernova

In astrofisica si presentano casi in cui i plasmi presentano caratteristiche estreme, tali da dover essere trattati come **fluidi relativistici**. Stelle di neutroni magnetizzate rapidamente ruotanti emettono un vento di coppie elettrone-positrone con fattori di Lorentz di  $10^4$ - $10^6$ . Tale flusso ultrarelativistico impatta sul resto di supernova circostante e si forma una cosiddetta **Pulsar Wind Nebula**, che emette radiazione non termica su tutto lo spettro. Le particelle sono infatti accelerate allo shock terminale del vento fino ad energie del PeV e spiraleggiando attorno ai campi magnetici amplificati emettono per sincrotrone. In collaborazione col gruppo di **Astrofisica delle Alte Energie** dell'osservatorio di Arcetri ([www.arcetri.inaf.it/science/ahead](http://www.arcetri.inaf.it/science/ahead)) vengono effettuate simulazioni numeriche che ci permettono di riprodurre la dinamica e l'emissione della Nebulosa del Granchio e di altri oggetti simili, allo scopo di ricavare parametri fisici altrimenti non conoscibili. Sotto riportiamo il campo magnetico turbolento e le mappe di brillantezza nei raggi X, come da simulazioni e da osservazioni (satellite NASA **Chandra**).



### Plasmi astrofisici in relatività generale: stelle di neutroni e buchi neri

Plasmi astrofisici nel campo gravitazionale estremo dei cosiddetti **oggetti compatti** (stelle di neutroni e buchi neri) richiedono una trattazione basata sulla teoria della **relatività generale**. Ad Arcetri sono stati sviluppati un codice **shock-capturing** per l'evoluzione dei plasmi relativistici (**ECHO**) e uno per la modellizzazione della struttura magnetica delle stelle di neutroni (**XNS**), di cui mostriamo un esempio. Altri studi numerici sono stati rivolti alla simulazione dei **dischi di accrescimento** attorno a buchi neri. Il tasso di accrescimento è fortemente modificato nel caso che il disco presenti una velocità relativa iniziale non nulla (ad esempio in seguito ad eventi di fusione di due buchi neri supermassicci), vedi sotto una mappa di densità in scala logaritmica. Eventi di accrescimento periodico potrebbero inoltre essere spiegati da un effetto di **dinamica turbolenta**, che su tempi scala di alcuni periodi di rivoluzione rigenera ciclicamente, amplifica e induce a migrare campo magnetico (qui in figura), in analogia col caso solare.

