

# IL MISTERO DELLE TEMPESTE SOLARI

Una recente ricerca svela alcuni aspetti fisici delle eruzioni quando i campi magnetici rilasciano enormi quantità di energia

ALESSANDRO BEMPORAD

**N**ELL'ULTIMO SECOLO abbiamo accumulato un'enorme quantità di conoscenze sulla nostra stella, il Sole, e sulla grande varietà di fenomeni che si verificano a partire dal suo interno – grazie alla nascita di una nuova disciplina, l'eliosmologia – fino agli strati più esterni della sua atmosfera, la corona solare. Il merito di questi notevoli avanzamenti va ascritto da una parte allo sviluppo tecnologico, che ha permesso la costruzione di strumenti in grado di osservare il Sole a tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico non solo da Terra, ma anche dallo spazio, eliminando così ogni effetto legato alla presenza dell'atmosfera terrestre, e dall'altra ovviamente all'impegno in termini di energie umane spese da centinaia di ricercatori che hanno lavorato per interpretare le osservazioni e sviluppare assieme teorie, modelli e simulazioni in grado di riprodurle. Queste conoscenze sono state la base di partenza per lo sviluppo di tutti i modelli di evoluzione stellare, oltre a permettere la nascita stessa della fisica dei plasmi.

La cosa che più ha sorpreso e che continua tutt'oggi a sorprendere i fisici solari è la natura estremamente dinamica della nostra stella: il Sole può apparire relativamente tranquillo se osservato nella luce visibile, ma le osservazioni nell'UltraVioletto Estremo (EUV) hanno dimostrato al contrario che cambiamenti sul Sole avvengono a tutte le scale temporali. Tra i vari fenomeni osservati, i più violenti sono i brillamenti solari: in un singolo brillamento può essere rilasciata un'energia pari a  $\sim 10^{25}$  J (pari a circa 120 miliardi di bombe atomiche di Hiroshima) su tempi scala dell'ordine dei  $\sim 5$  minuti (la cosiddetta fase di *flash*). L'energia rilasciata viene distribuita in emissione elettromagnetica dalle onde radio fino ai raggi-X duri, onde d'urto interplanetarie e accelerazione di particelle (elettroni, protoni e nuclei pesanti) relativistiche e sub-relativistiche. I brillamenti solari sono spesso associati a espulsioni coronali di massa (CMEs, **Figura 1**), note anche come tempeste o eruzioni solari e costituite da enormi bolle di plasma (diametro spesso superiore a un diametro solare, circa  $1,4 \times 10^6$  km) che si espandono a velocità dell'ordine dei 1000 km/s trasportando una massa di  $10^{14}$ - $10^{16}$  g di plasma (confrontabile con quella dell'intera corona solare) alla temperatura tipica coronale



JOSHUA STRANGLIS, AIR FORCE

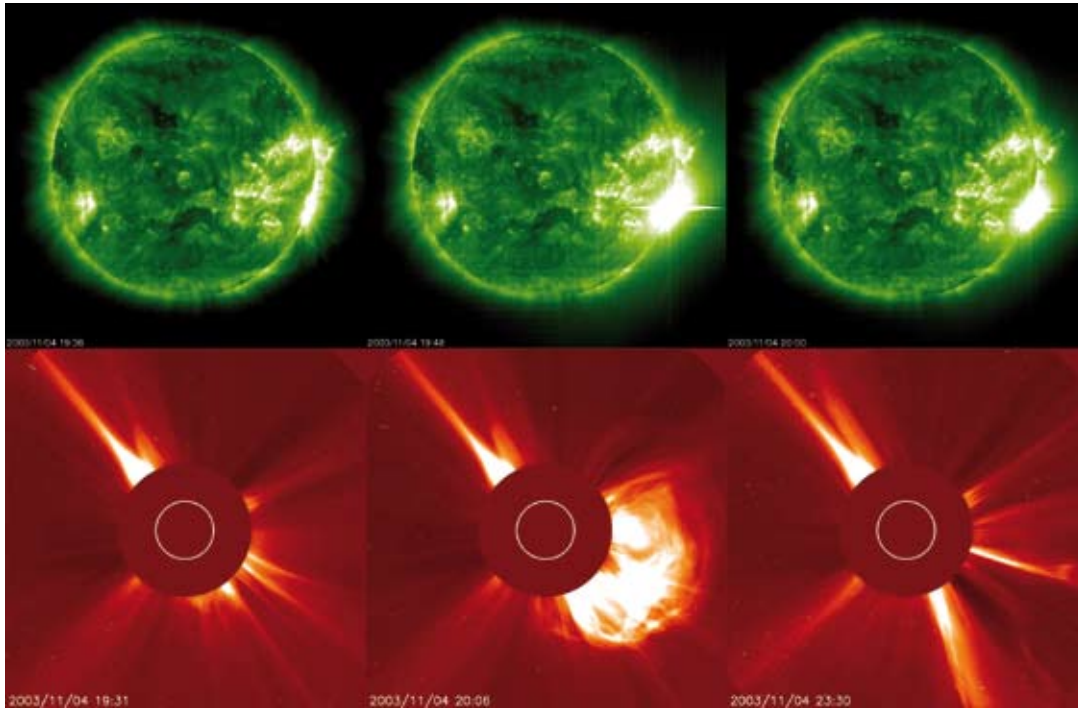
Un'aurora boreale fotografata in Alaska.

( $\sim 10^6$  K). Quando un'eruzione solare investe la Terra può provocare una tempesta geomagnetica nel corso della quale, oltre alle splendide aurore polari, si possono verificare molti fenomeni che influiscono direttamente sulla nostra vita come il danneggiamento dei satelliti per telecomunicazioni e sistemi Gps, blackout di intere regioni a causa delle intense correnti indotte e disturbi dei segnali radio a causa delle variazioni ionosferiche. Anche per questi motivi, comprendere quali siano i processi fisici all'origine delle tempeste solari può essere fondamentale per prevederle, cosa attualmente impossibile, e allertare in tempo l'umanità del loro arrivo.

Purtroppo però non è ancora noto quale sia la causa ultima dei brillamenti e delle tempeste solari. Sappiamo per certo che i principali responsabili sono in qualche modo gli intensi campi magnetici presenti sulla superficie del Sole (la fotosfera), che in corrispondenza delle macchie solari possono raggiungere anche i 2000-4000 G (rispetto al debole campo terrestre dell'ordine di 0,3-0,6 G – **Figura 2**). A questa conclusione si arriva con semplici considerazioni energetiche: considerando l'energia trasportata ed emessa da una tipica

tempesta solare nelle sue varie forme (potenziale, cinetica, termica, di radiazione, il tutto pari a  $\sim 10^{25}$  J) e il volume tipico coinvolto ( $\sim 10^{24}$  m<sup>3</sup>) si ottiene una densità di energia dell'ordine di 10 J/m<sup>3</sup>. Nella fotosfera una densità di energia confrontabile è posseduta solo dal campo magnetico: un campo già solo dell'ordine dei 100 G possiede una densità di energia pari a  $\sim 40$  J/m<sup>3</sup>, mentre le densità di energia termica, cinetica o gravitazionale fotosferiche sono ordini di grandezza più basse. L'enorme energia rilasciata nei brillamenti può provenire quindi solo dai campi magnetici; ma quali processi fisici sono responsabili di questo rilascio e conversione di energia magnetica in energia cinetica, termica e di radiazione?

Si ritiene oggi che questa conversione dell'energia magnetica avvenga attraverso un processo fisico noto come *riconnesione magnetica*. Le modalità di funzionamento di questo processo lasciano però ancora molte questioni in sospeso e del resto la storia che ha portato alla sua formulazione è abbastanza travagliata, oltre che piuttosto recente. È solo dopo la nascita nei primi anni '40 della *magnetoidrodinamica* (MHD - la disciplina che studia la dinamica dei fluidi elettricamente carichi,



**Figura 1.** In alto, sequenza di immagini del disco solare nell'UV Estremo durante un brillamento solare. Le immagini mostrano i gas della bassa corona a una temperatura di circa  $1.5 \times 10^6$  K. In basso, sequenza di immagini della corona solare nella luce visibile nel corso della tempesta solare seguita al brillamento. Il disco rosso al centro rappresenta l'occultatore del coronografo, mentre il cerchio bianco mostra la dimensione proiettata e la posizione del disco solare coperto dall'occultatore stesso.

come i plasmi solari) e dopo i fondamentali lavori di R. Giovanelli e di J. Dungey, che nei primi anni '50 fu coniato il termine stesso di riconnessione magnetica. Si capì poi che questo fenomeno non poteva verificarsi nell'approssimazione di una magnetoidrodinamica «ideale», cui si ricorre spesso per trattare il plasma coronale che, in condizioni tipiche, può essere approssimato come un fluido con resistività elettrica  $\rho = 0$ . Nella MHD ideale infatti la topologia delle linee di campo magnetico non può cambiare, ossia le linee di campo possono deformarsi, ma (forzando un po' i termini) non possono mai essere «tagliate» e «incollate» tra loro, come avviene invece con la riconnessione. Per avere riconnessione e spiegare i brillamenti era necessario abbandonare localmente l'ipotesi della MHD ideale ( $\rho \neq 0$ ).

Usando la stima della resistività «classica»  $\rho_c$  del plasma calcolata nei primi anni '60 fu proposto un primo modello di riconnessione detto di Sweet e Parker. Questo modello considera una regione di spazio in cui si affacciano linee di campo con orientazione opposta (**Figura 3**) caratterizzata per la legge di Ampère da elevata densità di corrente e denominata foglio di corrente (o *current sheet*, CS). Si suppone che la riconnessione avvenga in una regione centrata sul foglio di corrente carat-

terizzata da lunghezza  $L$  e spessore  $l$ , con  $L \gg l$ , detta regione di diffusione (*diffusion region* – DR), al di fuori della quale si distinguono una zona di afflusso (*inflow*) e una di efflusso (*outflow*) del plasma che viene riscaldato e accelerato dalla riconnessione.

Questo modello sembrò inizialmente funzionare; pochi anni dopo si capì però che il tasso di riconnessione così ottenuto era troppo basso, ordini di grandezza inferiore rispetto a quanto osservato nei brillamenti. Fu quindi Petschek a proporre di aumentare drasticamente il tasso di riconnessione sino a circa di 3 ordini di grandezza assumendo una regione di diffusione molto più compatta (lunghezza  $L' \sim l$ ) rispetto al modello di Sweet e Parker. Come si scoprì poco più di venti anni dopo, grazie alle simulazioni numeriche di Biskamp, la soluzione proposta non era compatibile però con una resistività  $\rho_c$  spazialmente uniforme: l'unico modo per ottenere una soluzione stazionaria era assumere nella regione di diffusione una resistività  $\rho^*$  (detta *resistività anomala*) molto più alta della  $\rho_c$ . Alcuni anni dopo è stato inoltre dimostrato che per una resistività classica uniforme il modello di Petschek si riduce matematicamente al modello di Sweet e Parker; in ogni caso, l'espressione per la  $\rho_c$  non è probabilmente applicabile nei

brillamenti solari, dove i campi elettrici coinvolti possono superare un valore limite di validità della  $\rho_c$  detto campo di Dreicer. Insomma: era quasi tutto da rifare.

Negli ultimi anni per risolvere questi problemi sono state proposte principalmente due teorie alternative: la prima cerca di giustificare l'esistenza della resistività anomala invocando la turbolenza del plasma contenuto nella regione di diffusione.

La teoria magnetoidrodinamica prevede infatti l'esistenza di numerosi processi di instabilità che possono verificarsi all'interno di un foglio di corrente in grado di portare alla formazione di moti turbolenti che aumenterebbero localmente il tasso di riconnessione. Una seconda teoria, più recente, propone invece di spiegare gli elevati tassi di riconnessione osservati nei brillamenti tenendo conto di un termine non dissipativo - detto termine di Hall - presente nella legge di Ohm generalizzata; termine che produrrebbe la cosiddetta resistività di Hall più elevata della classica e una riconnessione «alla Petschek» sufficientemente veloce. Non è noto però quale di queste teorie sia la più corretta.

Per risolvere veramente il problema l'unica via che abbiamo è confrontare tra loro teoria e dati sperimentali. Attualmente abbiamo solo due metodi per studiare sperimentalmente il comportamento in natura dei plasmi: il primo consiste nella costruzione di laboratori di fisica del plasma, dove con particolari tecniche di confinamento magnetico, ad esempio come avviene nei tokamak, è possibile osservare e studiare direttamente il comportamento dei plasmi. Benché questi studi abbiano prodotto risultati fondamentali è evidente che i fenomeni ad altissima energia osservati nei brillamenti solari e in altri campi dell'astrofisica non possono in alcun modo essere riprodotti in laboratorio. Il secondo metodo consiste quindi nell'osservazione diretta di questi fenomeni sul Sole e nell'universo e negli

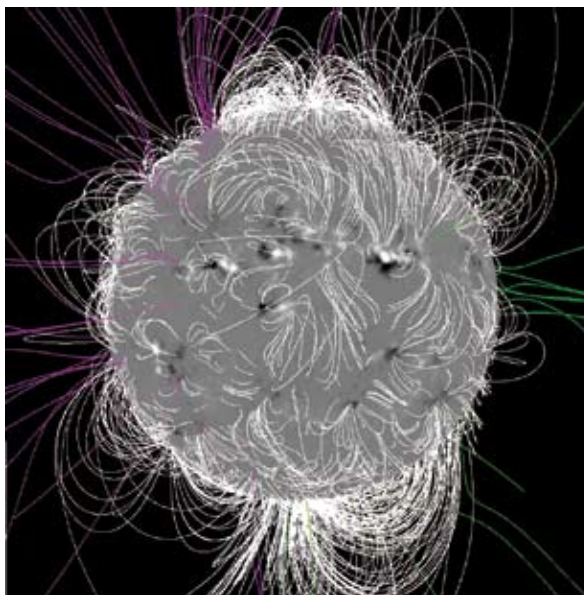


Figura 2. Campi magnetici coronali estrapolati dalle misure dei campi fotosferici.

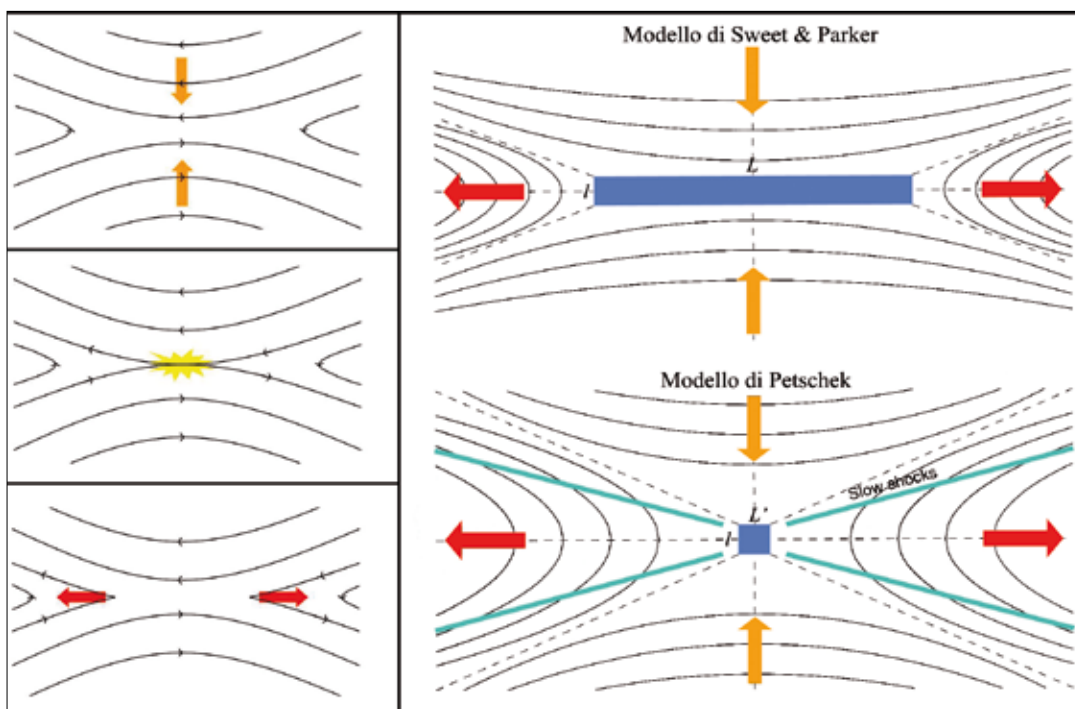
ultimi decenni moltissimi strumenti sono stati progettati e costruiti a questo scopo. Data la sua vicinanza alla Terra, il Sole è chiaramente il più adatto per essere utilizzato come vero e proprio laboratorio naturale dove poter approfondire le nostre conoscenze di fisica dei plasmi.

Tra le numerose missioni spaziali dedicate all'osservazione del Sole, sono stati raggiunti recentemente suc-

cessi inattesi dalla sonda SOHO (*Solar & Heliospheric Observatory*). Questa sonda ancora oggi operativa è stata lanciata a fine 1995, con una collaborazione tra Esa e Nasa, ed essendo localizzata in orbita attorno al punto Lagrangiano L1 tra la Terra e il Sole, ha permesso per la prima volta un'osservazione ininterrotta del Sole e della corona solare dall'ultravioletto estremo fino alla luce visibile. Tra i 12 strumenti a bordo del satellite il coronografo spettrometro UVCS (*UV Corona-graph Spectrometer*) ha permesso un'osservazione continua degli spettri coronali nell'ultravioletto estremo fornendo informazioni uniche sulle proprietà di ioni ed elettroni coronali. Grazie a questo strumento, sviluppato in parte dal gruppo di fisica solare dell'Osservatorio Astronomico di Torino, sono state scoperte caratteristiche tutt'ora inspiegate della corona solare e sono stati fatti notevoli passi avanti nella comprensione del riscaldamento coronale, dell'accelerazione del vento solare, delle caratteristiche dei pennacchi coronali e infine delle eruzioni solari. In particolare, gli studi sulle espulsioni coronali di massa, basati sui dati di questo spettrometro, hanno fornito elementi unici sulla loro densità, temperatura, sulle loro velocità di espansione nello spazio tridimensionale, sulla composizione dei plasmi di cui sono costituite e infine sull'origine degli intensi segnali radio associati agli eventi più violenti.

Oltre a diversi studi relativi alle osservazioni nell'ultravioletto estremo, negli ultimi anni sono stati pubblicati anche alcuni lavori basati



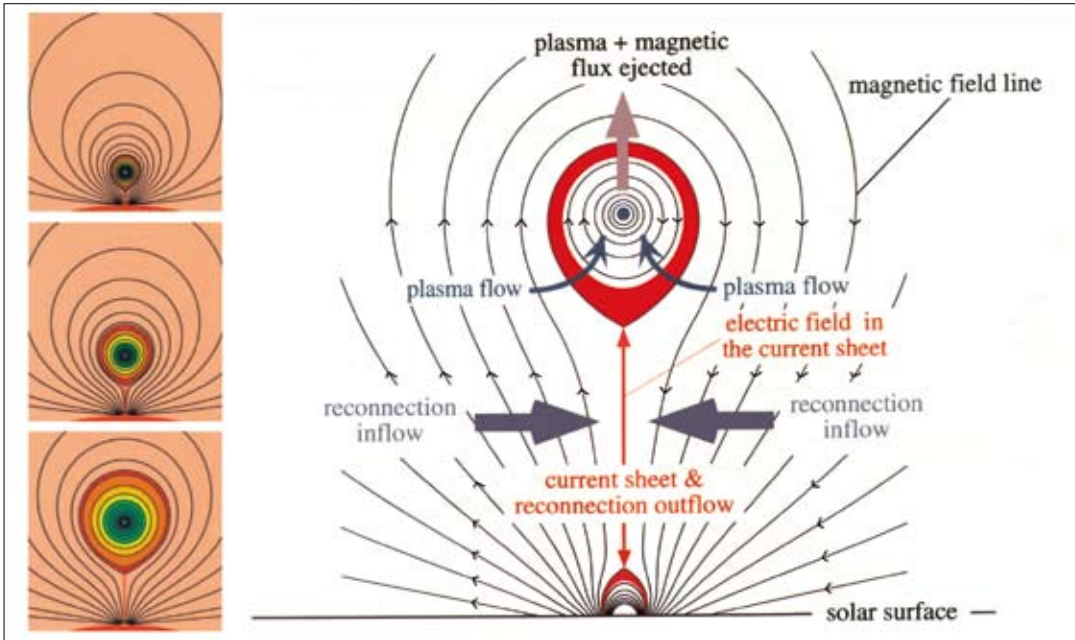


**Figura 3.** A sinistra, sequenza che illustra il concetto di riconnessione magnetica. Una coppia di linee di campo magnetico di polarità opposta vengono a collidere muovendosi verticalmente nel disegno (freccie arancioni, moto di afflusso), andando quindi a formare per riconnessione una nuova coppia di linee che si espandono orizzontalmente (freccie rosse, moto di efflusso). Il plasma nel corso della riconnessione subisce un riscaldamento, compressione e accelerazione. A destra: i primi due modelli di riconnessione proposti storicamente, ossia quello di Sweet e Parker (in alto) e di Petschek (in basso): i due modelli si differenziano per la dimensione della regione di riconnessione, e quindi per la velocità di riconnessione risultante.

su dati relativi all'evoluzione coronale osservata *dopo* il transito delle eruzioni solari. Queste osservazioni sono molto importanti: gli attuali modelli magnetoidrodinamici prevedono infatti che dopo un'eruzione la riconnessione magnetica «richiuda» le linee di campo magnetico coronale dietro all'eruzione, formando nella bassa corona delle arcate (o *loops*, ben osservate nei raggi X e nell'ultravioletto estremo) e nella corona estesa un foglio di corrente che connette la base della bolla di espulsione - in espansione nello spazio interplanetario - con le arcate coronali stesse (**Figura 4**). Tuttavia i modelli magnetoidrodinamici e la teoria si scontrano con i risultati osservativi almeno in due punti: anzitutto l'inattesa persistenza di queste strutture (fino ad alcuni giorni dopo le eruzioni, in contrasto con i modelli che prevedono una rapida erosione del foglio di corrente a causa della riconnessione. Inoltre, la teoria prevede che la riconnessione avvenga nella corona su scale spaziali molto piccole (dell'ordine del raggio di Larmor protonico,  $\sim 1 - 10$  m), mentre le osservazioni mostrano dopo le eruzioni fogli di corrente con spessori dell'ordine dei  $10^4 - 10^5$  km. Lo studio dei fogli di corrente post eruzione tramite lo spettro-

metro UVCS è quindi fondamentale proprio per colmare queste lacune e spiegare come avvenga il processo di riconnessione magnetica al loro interno, processo che come abbiamo visto non è ancora stato compreso. Tuttavia, osservazioni di questo tipo sono molto rare data l'impossibilità di prevedere questi eventi (ci sono infatti solo cinque lavori pubblicati sull'argomento).

Un insieme unico di osservazioni è stato acquisito dallo spettrometro UVCS a bordo di SOHO nel novembre del 2002: in particolare, a seguito di un'eruzione solare verificatasi in questo mese, lo strumento ha seguito l'evoluzione degli spettri coronali nell'ultravioletto estremo in modo continuativo per più di due giorni. L'unicità di questi dati consiste proprio nella loro eccezionale durata temporale, che ha permesso di studiare l'intera evoluzione del foglio di corrente: in altri casi infatti difficilmente si è osservato un simile fenomeno per più di alcune ore. La caratteristica più interessante di questi spettri era la persistenza per tutto il periodo di osservazione di un'intensa emissione in una riga dello ione  $\text{Fe}^{+17}$  (**Figura 5**), osservata molto raramente nella corona, date le elevatissime temperature (circa  $5 \times 10^6$  K) di mas-



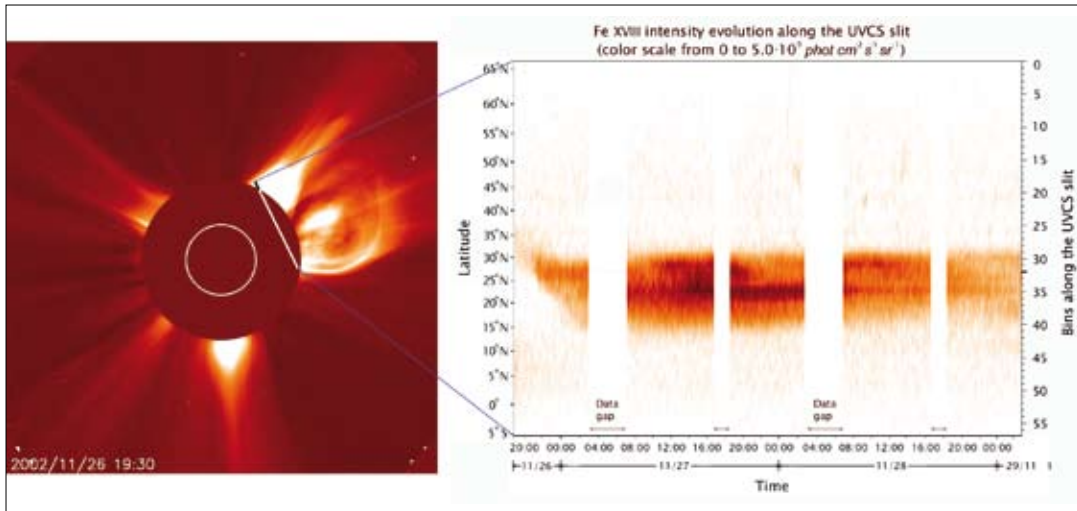
**Figura 4.** Modello magnetoidrodinamico di espansione di un'espulsione coronale di massa. Il modello prevede che durante l'espansione della bolla si formi per riconnessione magnetica un foglio di corrente che connette la base della bolla con le arcate post eruzione. Al suo interno il modello prevede elevate temperature del plasma, riscaldato dalla riconnessione magnetica.

sima formazione di questo ione, più alte persino delle tipiche temperature coronali ( $\sim 1 \times 10^6$  K). Prima di queste osservazioni si prevedeva che la riconnessione magnetica riscaldasse il plasma all'interno dei fogli di corrente, ma come spiegare il riscaldamento continuativo osservato per più giorni (un processo quindi pressoché stazionario) dopo l'espulsione coronale di massa? Inoltre lo spettrometro ha osservato questa emissione ad alta temperatura a un'altezza di 0,7 raggi solari dalla superficie, ma il plasma era riscaldato dalla riconnessione localmente a quest'altezza, oppure veniva riscaldato più in basso ed espulso poi verso l'esterno? Quali informazioni è possibile poi ricavare sul processo di riconnessione all'origine del riscaldamento osservato?

Per rispondere a queste domande, in un primo lavoro abbiamo utilizzato questi dati per studiare l'evoluzione di densità e temperatura elettronica all'interno del foglio di corrente, studio che ha sfruttato le tecniche di diagnostica del plasma coronale sviluppate negli ultimi venti anni in parte anche dal gruppo dell'Osservatorio Astronomico di Torino. I nostri risultati hanno dimostrato per la prima volta che nel corso dei due giorni successivi all'eruzione il plasma del foglio di corrente si raffredda progressivamente da una  $T$  iniziale di più di  $8 \times 10^6$  K ad una  $T$  finale di circa  $3 \times 10^6$  K, tendendo alla  $T$  coronale. Inoltre fluendo dalla corona esterna all'interno del foglio il plasma su-

bisce una compressione che ne aumenta la densità di un fattore  $\sim 7$ , pressoché costante nel tempo. Da qui si deduce che il riscaldamento atteso per compressione adiabatica è inizialmente inferiore al riscaldamento osservato, quindi altri processi fisici sono responsabili delle elevate temperature osservate. Ma, qualunque sia la natura di questi processi, verso la fine delle osservazioni il riscaldamento dalla sola compressione adiabatica è sufficiente per giustificare la temperatura finale osservata: l'efficacia di questi processi - teoricamente ignoti - decade quindi progressivamente nel tempo.

Questi risultati fondamentali sono stati il punto di partenza di un secondo lavoro nel quale chi scrive ha invece cercato di investigare la natura dei processi che riscaldano il plasma del foglio di corrente. Il lavoro parte dallo studio dell'evoluzione del profilo della riga Fe XVIII 974Å, mai indagato precedentemente in nessuno dei lavori pubblicati. Questo profilo mostra una larghezza molto maggiore di quanto atteso dalla temperatura di massima formazione dello ione  $\text{Fe}^{+17}$  e dalle temperature elettroniche osservate, una larghezza corrispondente a  $2 \times 10^7$  K all'inizio delle nostre osservazioni, ossia di un fattore 20 più alto della temperatura tipica coronale. Un allargamento del genere può essere spiegato in termini di moti turbolenti del plasma, a causa dei quali ogni singolo ione emette un profilo «spostato» verso il rosso o



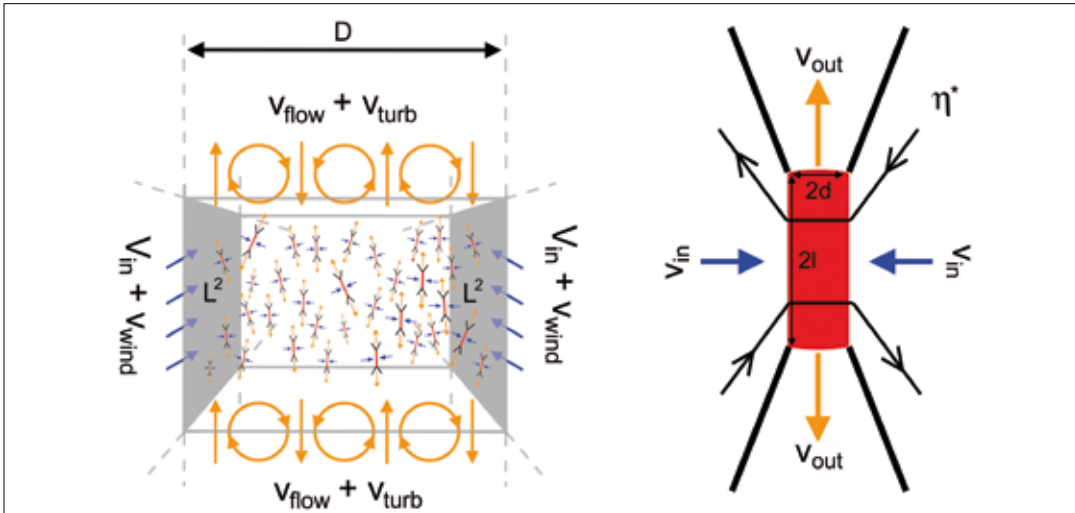
**Figura 5.** A sinistra, un'immagine della corona in luce bianca nel corso dell'espulsione di massa coronale. La linea bianca mostra il campo di vista della fenditura dello spettrometro utilizzato per le osservazioni. A destra: evoluzione dell'intensità della riga Fe XVIII 974Å (emessa dallo ione Fe<sup>17+</sup>) osservata a seguito dell'eruzione. L'emissione in questa riga proviene dal plasma alla temperatura di ~5×10<sup>6</sup> K, circa 5 volte più alta della temperatura tipica coronale, ed è quindi stata interpretata come emissione proveniente dal plasma riscaldato per riconnessione all'interno dello strato di corrente post-eruzione.

il blu per effetto Doppler, generando un profilo totale osservato allargato. La misura dell'allargamento consente una stima della velocità media con la quale avvengono questi moti: ne risulta che nel corso dei due giorni di osservazione la velocità di turbolenza all'interno del foglio di corrente decade progressivamente da circa 60 km/s iniziali fino a 30 km/s finali. È questa la prima volta che si è osservata e stimata direttamente la turbolenza del plasma in un foglio di corrente post-eruzione. Questa misura fondamentale suggerisce quindi che l'elevata resistività anomala richiesta dalle attuali teorie di riconnessione può essere collegata all'esistenza di turbolenza nel plasma del foglio e non alla presenza di resistività di Hall.

Ma è possibile spiegare grazie alla turbolenza anche l'elevata persistenza di questa struttura e il suo spessore molto maggiore di quanto previsto dalle teorie di riconnessione? Come ho verificato, sembra proprio di sì: esistono infatti numerosi modelli di riconnessione magnetica turbolenta che prevedono la formazione di una struttura frattale all'interno del foglio di corrente «macroscopico» (*M-CS*), al cui interno la riconnessione avverrebbe in modo auto-simile su tutte le scale, formando bolle di plasma di dimensioni sempre più piccole fino a raggiungere appunto le scale microscopiche attese dalla teoria (**Figura 6**). Assumendo in particolare l'esistenza di un elevato numero di fogli di corrente microscopici (*μ-CS*, di dimensioni inferiori alla risoluzione di qualunque telescopio, quindi non osservabili) è possibile di-

mostrare che l'allargamento turbolento stimato a partire dalle velocità di turbolenza osservate è in ottimo accordo con lo spessore osservato del foglio di corrente macroscopico. Inoltre, imponendo la conservazione dell'energia e il bilancio di pressione tra il plasma coronale esterno al *M-CS* ed il plasma interno al *M-CS*, è possibile dimostrare che il processo procede in modo stazionario e che le elevate temperature osservate sono dovute sia a compressione adiabatica, sia a riconnessione magnetica che avviene nei fogli di corrente microscopici. Con l'andare del tempo però la frazione di energia magnetica che viene convertita in energia termica dalle riconnessioni locali in questi ultimi diminuisce progressivamente, mentre l'afflusso di plasma dall'esterno avviene a tasso costante: ne risultano le progressive diminuzioni osservate della temperatura del plasma contenuto a livello della struttura macroscopica e della sua velocità di turbolenza.

Questo lavoro non ha quindi dimostrato l'esistenza di tali strutture a piccola scala, attualmente inosservabili, ma ha mostrato che assumerne l'esistenza permette comunque di risolvere i problemi attualmente esistenti tra la teoria della riconnessione magnetica e l'osservazione dei fogli di corrente che si formano dopo le eruzioni solari. È importante osservare tra l'altro che l'esistenza di simili strutture a piccola scala è già stata invocata per spiegare l'evoluzione osservata nel segnale radio e dei raggi-X proprio nel corso dei brillamenti (riconnessione intermittente o *bur-*



**Figura 6.** a sinistra, disegno che illustra come all'interno dello strato di corrente «macroscopico» osservato a seguito dell'eruzione solare (spessore D di circa 10 mila chilometri) possano esistere, a causa della turbolenza del plasma, una moltitudine di strutture «microscopiche» (non osservabili con le attuali risoluzioni) con dimensioni scala molto minori (dai 10 ai 10.000 metri) in cui avviene la riconnessione. A destra: uno zoom su una delle zone di riconnessione a piccola scala all'interno della quale avviene la conversione dell'energia magnetica in energia cinetica e termica del plasma, ossia l'accelerazione e riscaldamento del plasma, attraverso la riconnessione magnetica.

sty). Sembra quindi avverarsi la frase profetica pronunciata da E. Parker: «Abbiamo una teoria per tutto ciò che non può essere risolto con un telescopio». A questo punto l'unica possibilità che abbiamo per dirimere la matassa e risolvere il problema della riconnessione è di spingere al limite delle nostre possibilità lo sviluppo di nuove strumentazioni che permettano di osservare scale spaziali mai raggiunte prima e di verificare se queste riconnessioni a piccola scala esistano o meno. Un'opportunità importante potrebbe essere fornita dalla missione Solar Orbiter - a cui partecipa anche l'Osservatorio di Torino - che prevede la messa in orbita nel 2017 di una sonda che si avvicinerà fino a soli 0,25 unità astronomiche dal Sole al perielio, implicando già un aumento di un fattore 4 della risoluzione spaziale rispetto agli attuali telescopi localizzati a 1 unità astronomica. Tuttavia non sarà sufficiente: quindi, per osservare le piccole scale richieste, sarà anche fondamentale progettare e sviluppare nel prossimo futuro nuove strumentazioni in grado finalmente di vincere la sfida della riconnessione magnetica.

Alessandro Bemporad, INAF Osservatorio Astronomico di Torino.

**Bibliografia**

Alfvén, H., Existence of electromagnetic-hydrodynamic waves, *Nature*, Vol.150;405 (1942).  
 Alfvén, H., On the existence of electromagnetic-hydrodynamic

waves, *Arkiv foer Matematik, Astronomi och Fysic*, Vol. 39;2 (1942).  
 Aschwanden, M., *Physics of the solar corona – an introduction*, Springer-Verlag, 2004.  
 Bemporad, A., et al., Current Sheet evolution in the aftermath of a CME event, *Astrophys. J.*, Vol.638;1110 (2006).  
 Bemporad, A., Spectroscopic detection of turbulence in post-CME Current Sheets, *Astrophys. J.*, Vol.689;p.572 (2008).  
 Biskamp, D., Magnetic reconnection via Current Sheets, *Phys. of Fluids*, Vol.29;1520 (1986).  
 Dungey, J.W., Interplanetary magnetic field and the Auroral Zones, *Phys. Rev. Letters*, Vol.6;47 (1961).  
 Giovanelli, R.G., Magnetic and Electric Phenomena in the Sun's Atmosphere associated with Sunspots, *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 107,338 (1947).  
 Hale, G.E., On the probable existence of a magnetic field in sun-spots, *Astrophys. J.*, Vol. 28;315 (1908).  
 Kulsrud, R. M., Magnetic reconnection: Sweet-Parker versus Petschek, *Earth, Planets and Space*, Vol. 53;417 (2001).  
 Parker, E., Sweet's mechanism for merging magnetic field fields in conducting fluids, *Phys. Rev.*, Vol. 107;830 (1957).  
 Petschek, H.E., Magnetic Field Annihilation, *The Physics of Solar Flares*, Proc. of the AAS-NASA Symp. Washington, DC, NASA, STI Division, p.425 (1964).  
 Priest, E.R., *Solar Magnetohydrodynamics*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht (Holland), 1982.  
 Spitzer, L. Jr., *Physics of fully ionized gases*, Interscience Publishers, London (UK), 1962.  
 Sweet, P. A., *The neutral point theory of flares*, in IAU Symp. 6, E.m. Phenomena in Ionized Gases, Cambridge Univ. Press, 123 (1958).