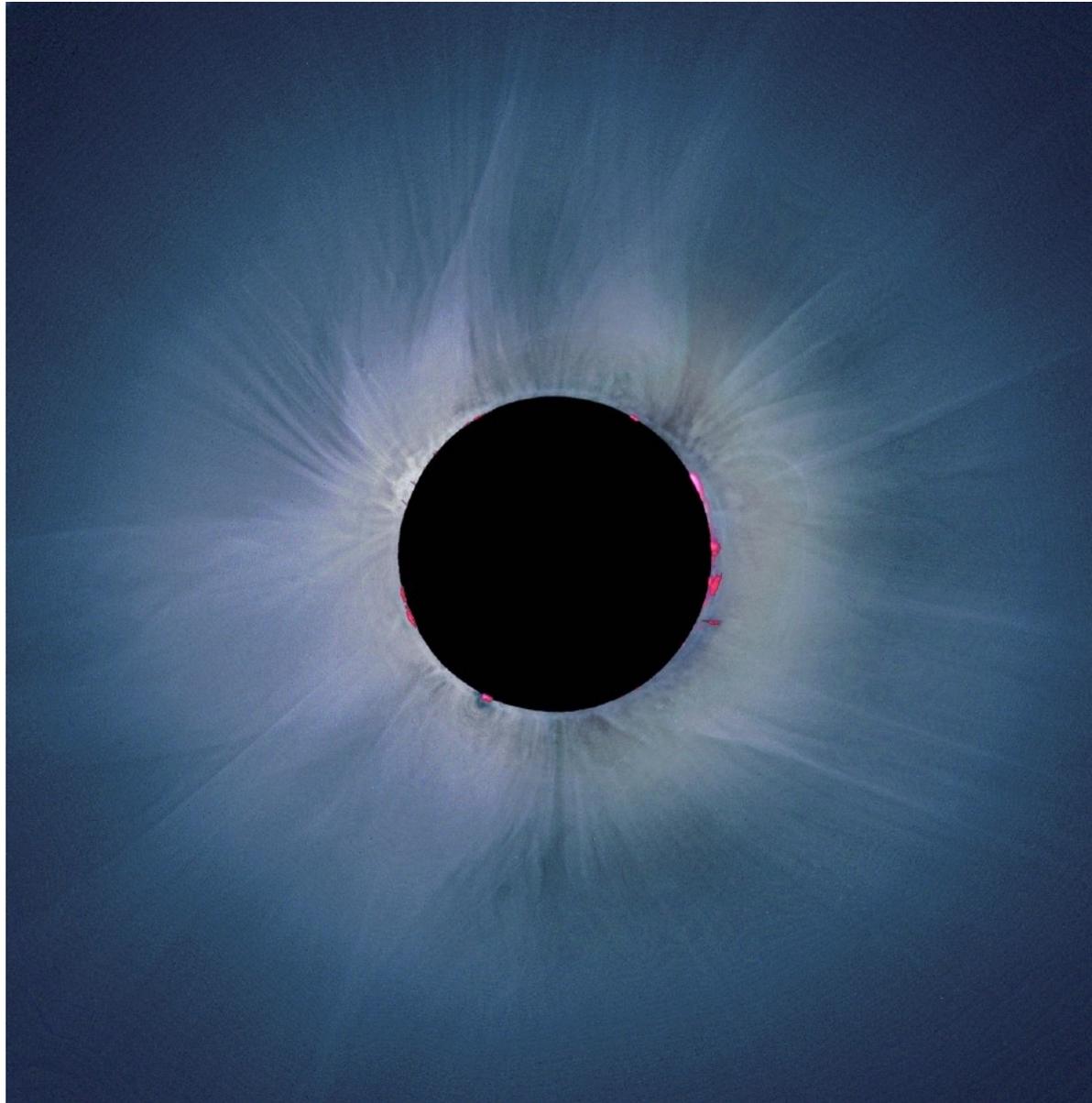


Spettropolarimetria Solare

Egidio Landi Degl'Innocenti, Marco Romoli & Luca Belluzzi



Importanza della Fisica Solare

Il Sole controlla il nostro ambiente e la nostra civiltà. Poter comprendere e predire l'influenza del Sole sul clima terrestre e sullo spazio circostante la Terra è una delle maggiori sfide della scienza moderna. Lo studio del Sole e delle interazioni fra il Sole e la Terra sta diventando sempre più importante nel nostro mondo tecnologico per la modellizzazione e la previsione di quei fenomeni di attività solare che influiscono sulle comunicazioni e su altri tipi di attività umane (interruzioni nelle radiocomunicazioni, funzionamento dei satelliti, sicurezza degli aerei in rotta polare, esposizione degli astronauti a rischi di radiazione, etc.).

Il Sole è l'oggetto astronomico più vicino e il più facilmente studiabile. Molti dei processi fisici che regolano il nostro Universo sono osservabili in grande dettaglio sul Sole (instabilità magneto-idrodinamiche, meccanismi di accelerazione di particelle, etc.).

Il Sole è un laboratorio di Fisica del Plasma unico nel suo genere. Nel suo ambiente si verificano fenomeni in condizioni fisiche che non possono essere realizzate nei laboratori terrestri (bassissime densità, valori di β che variano enormemente su scale di altezza ben osservabili, etc.). D'altro lato, il Sole si trova a una distanza relativamente piccola per poter studiare tali fenomeni in dettaglio.

Il Sole presenta numerosi e importantissimi "misteri" scientifici che costituiscono delle vere e proprie sfide per la scienza moderna (riscaldamento della corona, flares, etc.).

Lo studio del Sole è portato avanti con grande impegno in tutti i paesi tecnologicamente avanzati e anche in molti paesi in via di sviluppo. Per lo studio da Terra, si distinguono per impegno e sostegno finanziario gli Stati Uniti (ATST, High Altitude Observatory, National Solar Observatory, Naval Research Laboratory, NOAO, etc.), la Francia (Télescope THEMIS, Observatoire du Pic du Midi, Observatoire de Meudon), la Germania (Kiepenheuer Institut), la Spagna (Istituto de Asatrofísica de canarias, la Cina, etc. Notevole impegno è anche dedicato allo studio (molto più costoso) del Sole dallo spazio da parte delle più importanti agenzie spaziali (NASA, ESA, JAXA, ASI, etc.)

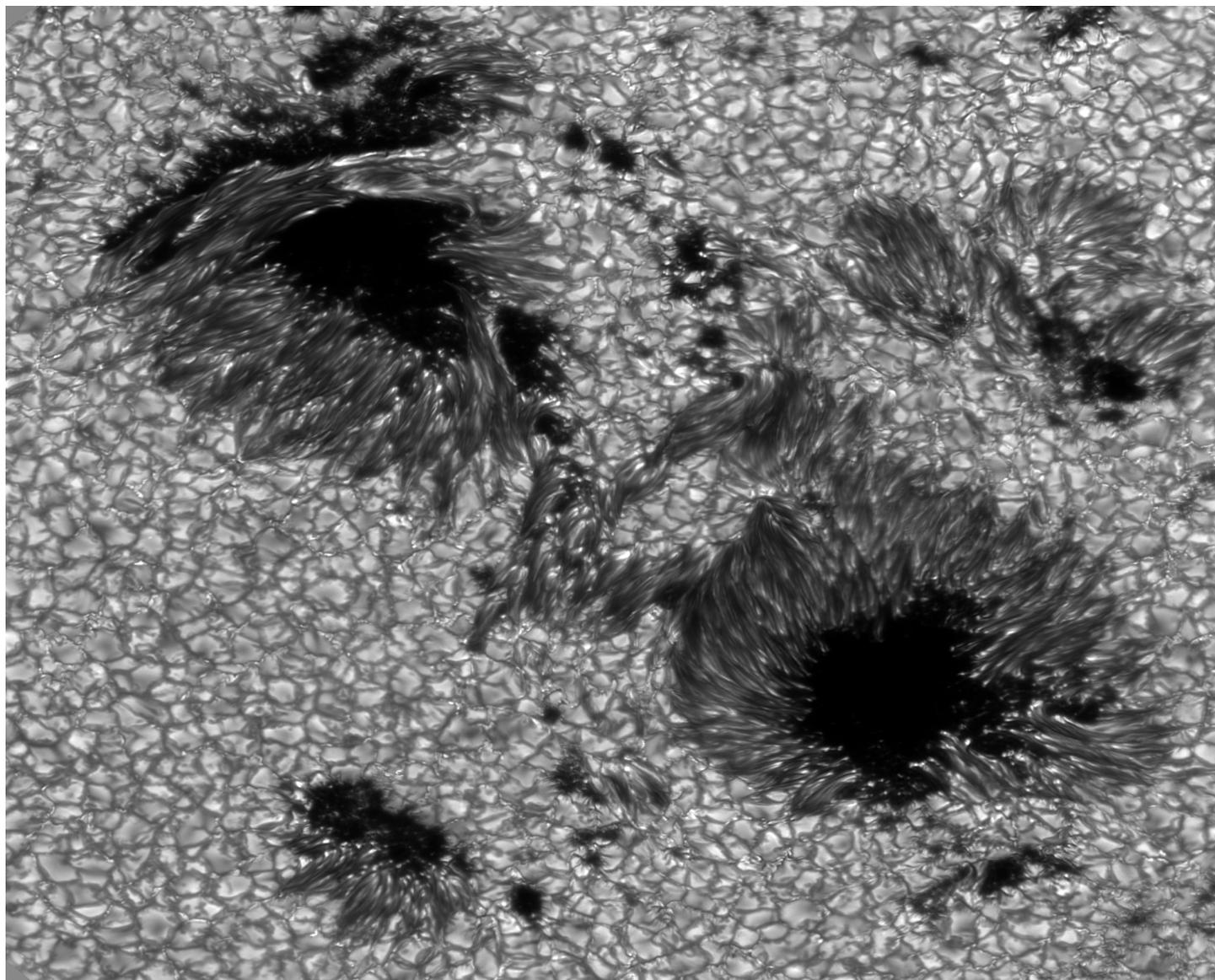
In tutti i fenomeni di fisica solare che rimangono ancora sostanzialmente incompresi, il magnetismo svolge un ruolo fondamentale. È quindi ovvio che la fisica solare si sia concentrata con particolare attenzione all'elaborazione di opportuni metodi di indagine, sperimentali e teorico/interpretativi, per riuscire a estrarre dalle osservazioni informazioni il più possibile quantitative sul vettore campo magnetico nell'atmosfera solare.

A partire dal 1908 (anno in cui l'astronomo americano George Ellery Hale mostra che le macchie solari sono sede di intensi campi magnetici dell'ordine del kgauss) si sviluppa una specifica disciplina di indagine che oggi prende il nome di Spettropolarimetria Solare. La semplice spettroscopia non è infatti sufficiente a permettere una diagnostica dei campi magnetici se non è implementata da osservazioni polarimetriche.

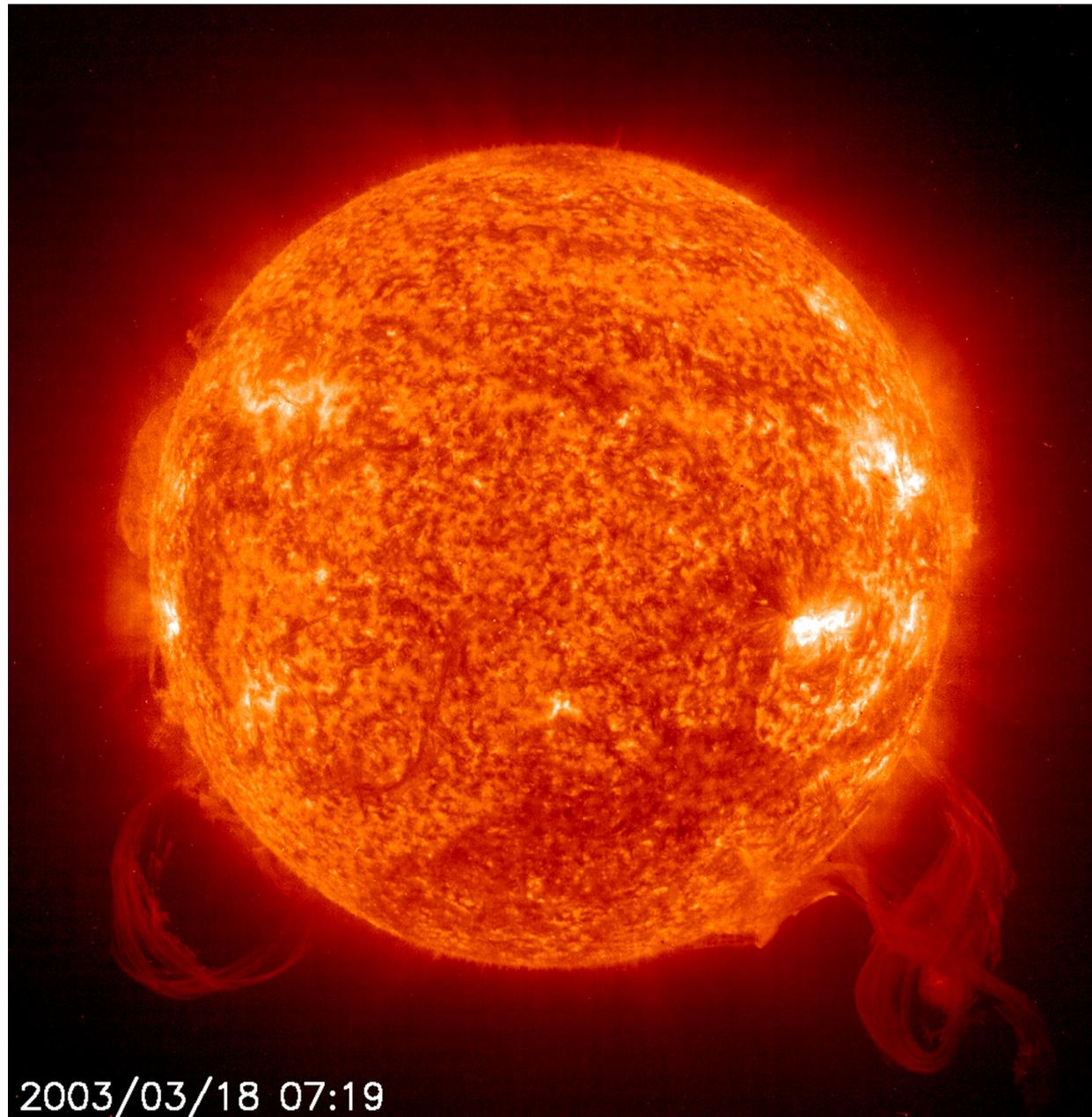
Lo spettropolarimetro (chiamato anche “Stokesmeter” perché fornisce la misura dei cosiddetti parametri di Stokes in funzione della lunghezza d'onda) diviene uno strumento di fondamentale importanza in fisica solare.

Vediamo alcuni esempi di strutture nelle quali vengono impiegate tali tecniche.

Macchie solari e regioni attive, ...



...protuberanze, qui osservate nella riga dell'Elio ionizzato a 304 Å dallo strumento EIT (Extreme UV Imaging Telescope) a bordo della missione SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)



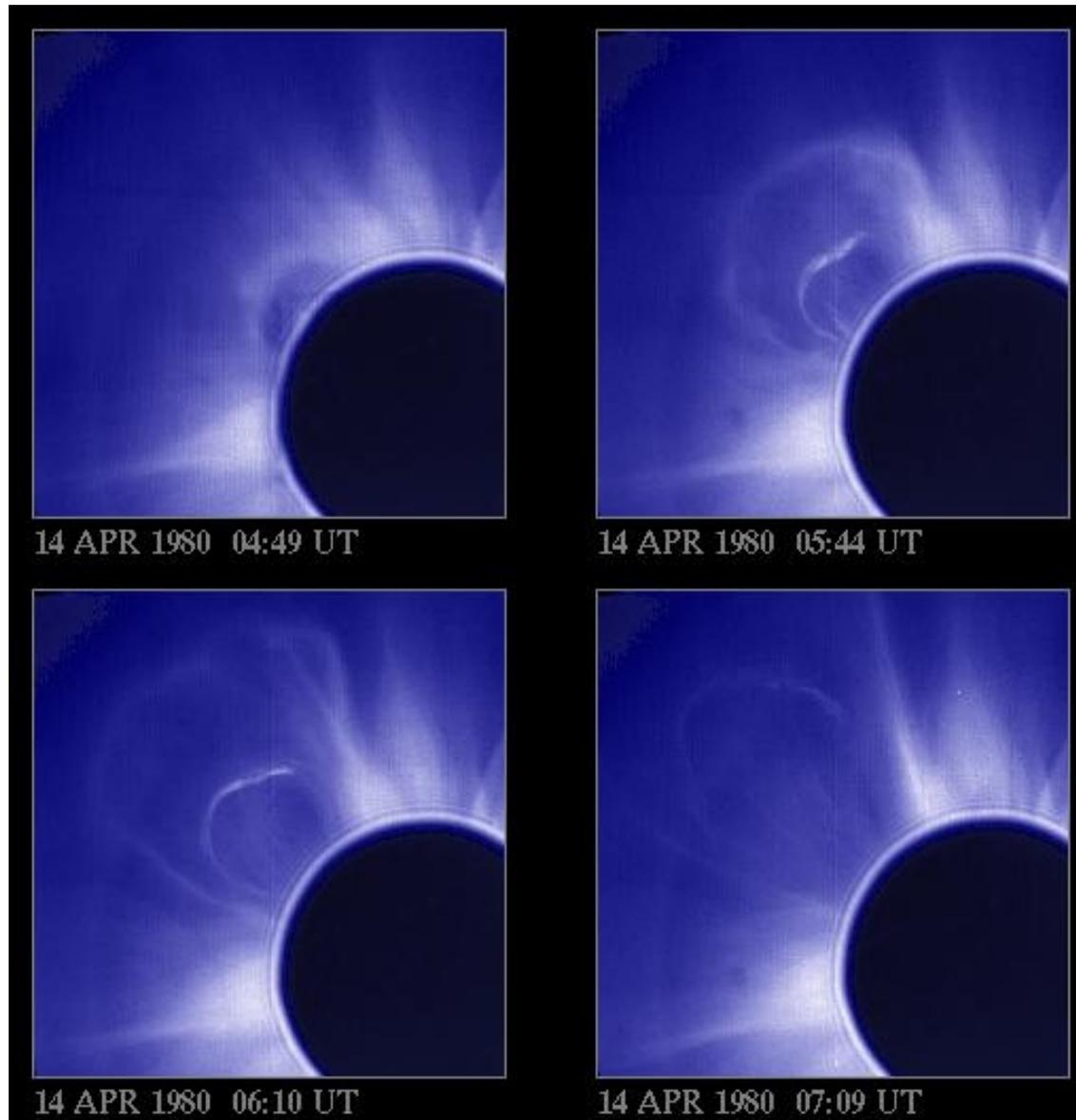
...corona, dove il campo magnetico contribuisce alla formazione di strutture ad archi (loops) che appaiono particolarmente brillanti in osservazioni in raggi X a causa dell'elevata temperatura, dell'ordine di 10^6 K, del plasma coronale. (Immagine del satellite Trace, Transition Region Coronal Explorer).



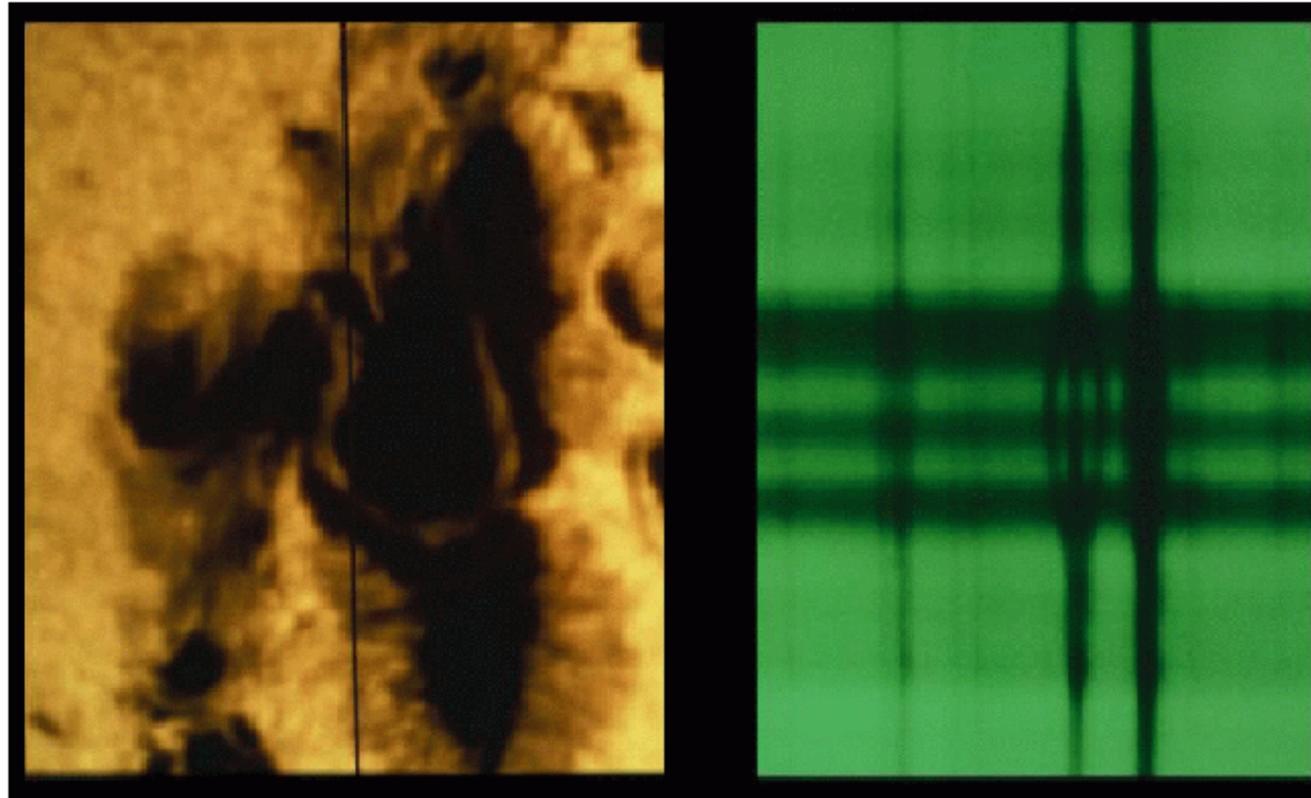
A proposito della corona bisogna sottolineare che, malgrado gli innumerevoli e costosissimi sforzi dedicati negli ultimi venti/trenta anni a comprendere la ragione fisica delle alte temperature coronali, il problema del riscaldamento della corona rimane ancora praticamente insoluto. I due meccanismi che sono stati proposti ormai da molto tempo (riconnesione magnetica, dissipazione di onde di Alfvén) sono entrambi connessi col magnetismo, ma le tecniche e i metodi che sono stati finora proposti per la misura dei campi magnetici a livelli coronali si sono dimostrati per il momento infruttuosi. Per questa ragione, la misura dei campi magnetici coronali rappresenta una vera e propria sfida per la ricerca in fisica solare.

La misura dei campi magnetici coronali è anche molto importante in connessione col problema della modellizzazione e della previsione delle cosiddette Coronal Mass Ejections. Come già detto, questi fenomeni possono infatti avere severe conseguenze sulle attività umane. Per questo, la possibilità di poter prevedere tali fenomeni sta divenendo sempre più importante per il nostro mondo tecnologico.

Immagini di una Coronal Mass Ejection eseguita da un coronografo. La quarta immagine dista temporalmente circa due ore dalla prima. Quando il plasma coronale raggiunge la Terra, due/tre giorni dopo, provoca aurore polari, tempeste geomagnetiche, problemi nelle radiocomunicazioni, etc.

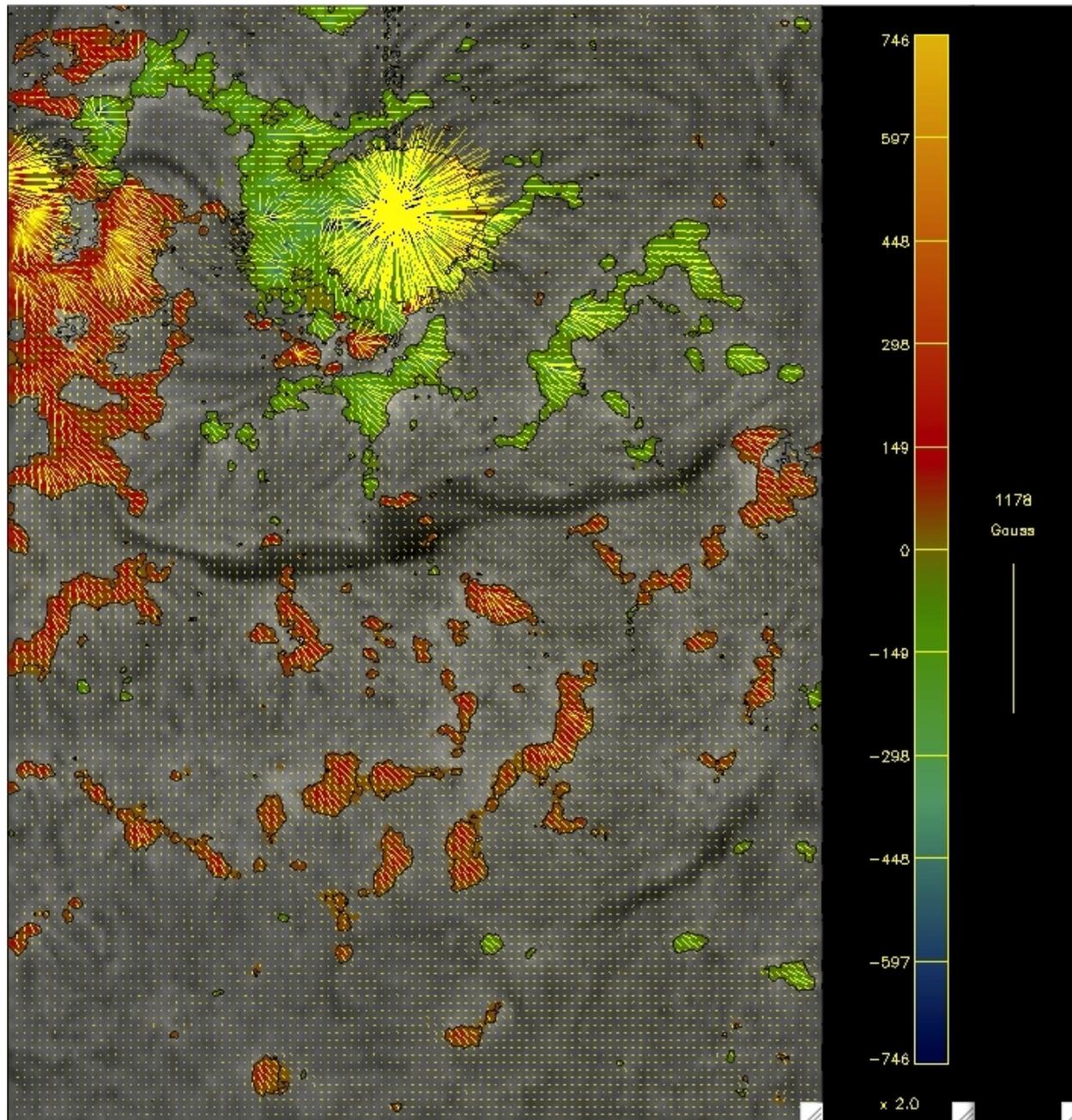


Per la misura dei campi magnetici, i fisici solari utilizzano tradizionalmente delle tecniche dette “spettropolarimetriche”. Tali tecniche sono state introdotte poco più di un secolo fa (1908) da parte dell'astronomo George Ellery Hale dopo pochi anni dalla scoperta dell'effetto Zeeman (1896). Oggi tali tecniche si sono notevolmente evolute grazie allo sviluppo di sofisticatissimi polarimetri capaci di misurare livelli di polarizzazione dell'ordine di una parte su 100,000.

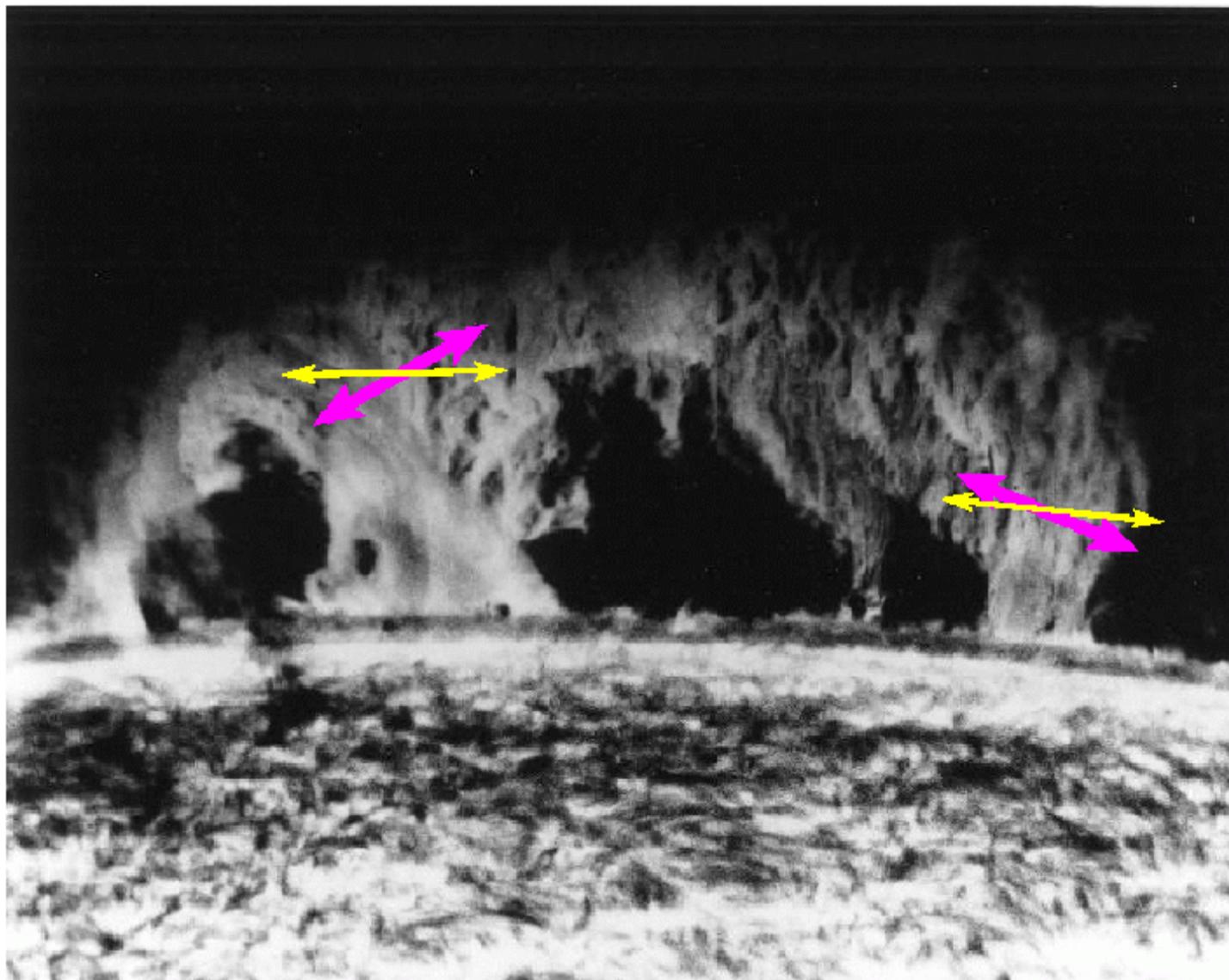


Effetto Zeeman osservato in una macchia solare. A sinistra l'immagine “slit-jaw” della fenditura, posizionata su una macchia solare. A destra una porzione dello spettro intorno alla riga del Ferro neutro a 5250 Å, con fattore di Landé = 3

Mediante tecniche spettropolarimetriche oggi si riescono a produrre “mappe magnetiche” di questo tipo.



Per la misura dei campi magnetici nelle protuberanze si utilizza invece l'effetto Hanle. In assenza di campo magnetico la radiazione diffusa dal plasma coronale è polarizzata linearmente in direzione parallela al bordo solare (freccie gialle). In presenza di un campo magnetico la polarizzazione lineare diminuisce e si produce una rotazione della direzione di polarizzazione (freccie magenta).



Dal punto di vista teorico bisogna sottolineare che l'interpretazione di misure spettropolarimetriche risulta spesso di notevole difficoltà sia perché la geometria del fenomeno in studio non è, ovviamente, nota a priori, sia perché la polarizzazione osservata in una riga spettrale è determinata, oltre che dal vettore campo magnetico, da vari altri fenomeni, atomici e di trasporto (polarizzazione di risonanza dovuta al pompaggio ottico, polarizzazione da impatto dovuta a fasci direzionali di particelle, fenomeni di dispersione anomala, depolarizzazione collisionale, etc.).

Il gruppo di spettropolarimetria di Arcetri ha contribuito a mettere su una base teorica rigorosa la trattazione dell'interazione fra materia e radiazione nelle atmosfere stellari. I risultati di tale lavoro sono oggi raccolti in un volume, "Polarization in Spectra Lines", pubblicato nel 2004, che è diventato un testo di riferimento per la comunità scientifica. Le numerosissime applicazioni astrofisiche hanno riguardato e riguardano soprattutto la diagnostica di campi magnetici solari e stellari.

Il campo di ricerca della spettropolarimetria solare comprende, a livello internazionale, più di un centinaio di ricercatori. A partire dal 1995, con cadenza triennale vengono organizzati i cosiddetti "Solar Polarization Workshops". I precedenti si sono svolti a San Pietroburgo (1995), Bangalore (1998), Tenerife (2002), Boulder, Colorado (2005), Locarno (2007). Il prossimo si svolgerà a Maui (Hawaii) nel Giugno 2010. Per quello successivo si parla di Firenze...

Progetti finanziati:

ASI: Esplorazione del Sistema Solare 2008-2010

Coordinatore: Ester Antonucci, Osservatorio di Torino

Subtask: *Missioni spaziali per misure di campo magnetico in ambito ILSW (International Living with a Star), in collaborazione con Marco Romoli*

PRIN MIUR 2007: Tecniche e Tecnologie Innovative per lo Studio del Magnetismo Solare

Coordinatore Nazionale: Egidio Landi Degl'Innocenti

Unità di Ricerca: Università di Firenze

Università di Roma Tor Vergata

Università di Pavia

Istituto Nazionale di Astrofisica

La “Scuola” di spettropolarimetria di Arcetri

Egidio Lauri

Stefano Bagnulo

Rafael Manzo Sainz



Roberto Casini

Javier Trujillo Bueno

Marco Landolfi

+ Maurizio Landi Degl'Innocenti, Silvano Fineschi, Marco Romoli, Luca Belluzzi