

2 Sistema Solare e Mezzo Interplanetario

2.1 Laboratorio di Fisica Cosmica

La polvere cosmica e, più in generale, i materiali solidi giocano un ruolo fondamentale in diversi processi che avvengono nel mezzo interstellare, interplanetario e sulla superficie dei corpi del Sistema Solare. Nell'ambito del Laboratorio di fisica cosmica, che l'OAC gestisce in collaborazione con l'Università di Napoli Parthenope, è in corso un progetto di ricerca finalizzato ad ottenere una migliore comprensione della natura e dell'evoluzione dei materiali cosmici attraverso lo studio di "analoghi" e mediante esperimenti di simulazione dei processi chimico-fisici che si svolgono nello spazio. Il Laboratorio è equipaggiato con strumenti di punta in grado di:

- produrre grani di polvere di diversa composizione chimica. Le tecniche di produzione prevedono l'applicazione di metodi di triturazione e setacciatura di minerali, scarica da arco voltaico e ablazione laser di bersagli;
- compiere studi delle proprietà morfologiche e strutturali. Allo scopo vengono utilizzati un microscopio elettronico ad emissione di campo e uno spettrofotometro Raman;
- compiere analisi sulla composizione chimica dei campioni mediante dispersione dell'energia di raggi X;
- effettuare analisi spettrofotometrica. Vengono impiegati cinque spettrofotometri per coprire l'intervallo spettrale dal lontano ultravioletto alla regione millimetrica.



Figura 13: Particolari della strumentazione del Laboratorio di Fisica Cosmica.

Inoltre, sono state messe a punto diverse tecniche sperimentali per studiare l'evoluzione dei materiali a seguito di riscaldamento termico (fino a 1100 °C), irraggiamento UV, bombardamento con atomi di idrogeno, irraggiamento laser.

Attraverso l'approccio di laboratorio è stato possibile contribuire al dibattito su alcuni degli argomenti di maggiore interesse nell'ambito delle attuali problematiche riguardanti i composti cosmici:

- interpretazione del *bump* a 220 nm nelle curve di estinzione interstellare;
- interpretazione dell'enigmatica dicotomia tra lo spettro di regioni diffuse, in cui la banda di assorbimento a 3.4 μm è presente, e quello di nubi molecolari caratterizzato dall'assenza della banda;
- evoluzione amorfo-cristallino della struttura dei silicati nelle comete e mezzo interstellare;
- caratterizzazione dell'emissività di analoghi cosmici a lunghezze d'onda sub-millimetriche e millimetriche e studio della sua dipendenza dalla temperatura.

2.2 Caratterizzazione di solidi marziani

L'esplorazione di Marte continua ad avere un'altissima priorità nel panorama delle scienze planetarie. La NASA, l'ESA e l'agenzia spaziale giapponese si stanno impegnando in missioni spaziali quali Mars Global Surveyor (MGS; NASA), Mars Odyssey (NASA), Mars Express (ESA) e Nozomi (Giappone), e nuove esplorazioni sono previste nel prossimo futuro.

L'interesse per lo studio della superficie di Marte e della componente solida atmosferica, in termini di natura dei materiali costituenti, deriva dal fatto che i dati relativi a questi materiali possono dare numerose informazioni sulla storia geologica di Marte quali natura, cronologia e durata dei processi superficiali, storia dell'erosione, del trasporto e della deposizione dei sedimenti, variazioni delle condizioni ambientali e climatiche, possibile presenza di acqua allo stato liquido sulla superficie del pianeta. La ricerca dell'acqua è attualmente uno degli obiettivi più perseguiti, considerato anche il relativo interesse esobiologico.

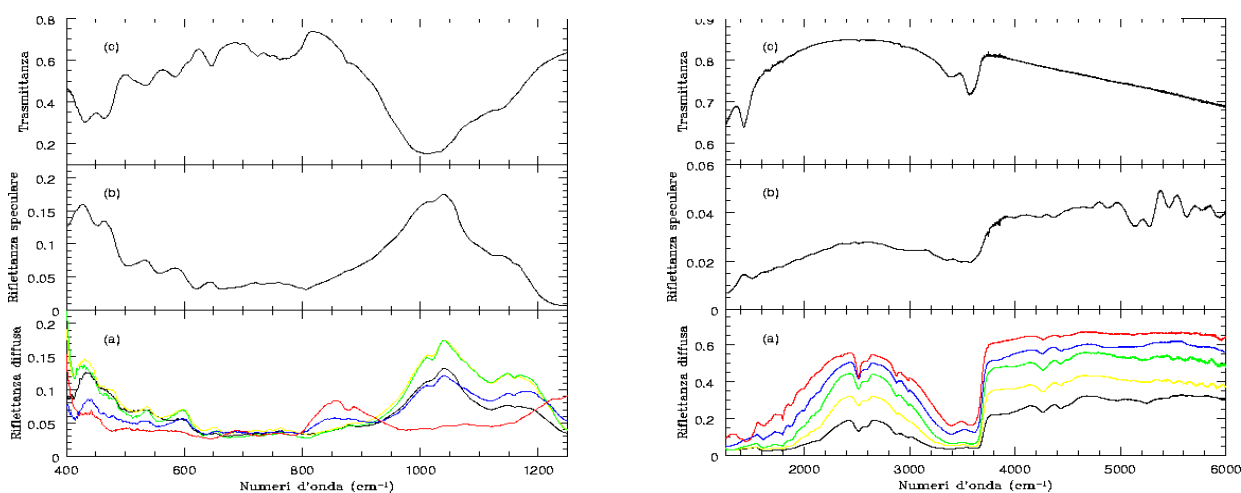


Figura 14: Spettri di andesite misurati in laboratorio nel medio (sinistra) e vicino infrarosso (destra): (c) trasmittanza, (b) riflettanza speculare e (a) diffusa al variare della dimensione d dei grani. Curva nera $200 < d < 500 \mu\text{m}$; gialla $100 < d < 200 \mu\text{m}$; verde $50 < d < 100 \mu\text{m}$; blu $20 < d < 50 \mu\text{m}$; rossa $< 20 \mu\text{m}$.

La spettroscopia infrarossa è lo strumento principale per la determinazione della mineralogia. L'IR è infatti l'intervallo spettrale in cui la maggior parte dei minerali e delle molecole atmosferiche mostra intense bande vibrazionali; inoltre, a causa della temperatura superficiale tipica, Marte mostra un massimo di emissione centrato a circa 10 μm , cioè nel medio infrarosso. Per questo motivo gli spettrometri spaziali lavorano essenzialmente nell'IR. In particolare il Thermal Emission Spectrometer (TES) a bordo dell'MGS copre l'intervallo spettrale 1700-200 cm^{-1} , e il Planetary Fourier Spectrometer (PFS), che sarà lanciato con Mars Express, coprirà l'intervallo 8333-250 cm^{-1} .

Presso l'OAC sono stati sviluppati metodi per l'interpretazione qualitativa e quantitativa degli spettri ottenuti da questi strumenti, attraverso un confronto accurato con quelli di materiali analoghi ottenuti in laboratorio. Il confronto è fatto utilizzando modelli di *scattering* multiplo, quale ad esempio la teoria di Hapke. I parametri chiave in tale confronto sono la distribuzione

dimensionale, le costanti ottiche, e le abbondanze relative nelle miscele di minerali. In figura 14 è riportato un esempio di variazioni delle proprietà spettroscopiche di un analogo marziano (andesite), misurato nel laboratorio dell'OAC, al variare della distribuzione dimensionale dei campioni.

L'obiettivo di questo studio è la determinazione delle proprietà ottiche, chimiche, morfologiche e spettroscopiche di materiali possibili analoghi della superficie di Marte al fine di ricavare composizione, abbondanze e dimensioni dei materiali solidi marziani dall'analisi dei dati osservativi. I materiali caratterizzati rientrano nel piano scientifico steso per il PFS di Mars Express e costituiscono la base per le analisi future dei dati provenienti da spettrometri spaziali che lavorano in IR.

2.3 Comete e asteroidi

Uno dei principali obiettivi delle scienze planetarie è la comprensione dell'origine del Sistema Solare. Una possibilità per indagare l'evoluzione delle condizioni fisiche e chimiche e le trasformazioni avvenute nel nostro Sistema Solare è offerta dallo studio degli oggetti minori come comete e asteroidi. In particolare, dalla conoscenza della composizione mineralogica è possibile ricavare informazioni sulla distribuzione della composizione chimica nella nebulosa proto-solare, sui processi di differenziazione chimica nei planetesimi in accrescimento o sull'identificazione dei corpi genitori delle varie classi di meteoriti.

La caratterizzazione dei materiali presenti sulla superficie degli asteroidi e nei nuclei cometari è essenzialmente basata sull'interpretazione delle proprietà spettrali attraverso le quali è possibile determinare la presenza, l'abbondanza e la composizione di minerali o di altre specie chimiche presenti. La spettroscopia nel medio e lontano infrarosso si è rivelata uno strumento tra i più potenti. In questo intervallo spettrale, infatti, è presente un gran numero di bande estremamente sensibili alle proprietà fisico-chimiche dei materiali. Purtroppo, la gran parte di questo intervallo spettrale non è accessibile da terra a causa del forte assorbimento atmosferico, ma la limitazione è stata superata grazie all'uso di strumenti a bordo di satelliti. Tra questi, l'IRAS (Infrared Astronomical Satellite) ed ISO (Infrared Space Observatory) hanno procurato al gruppo OAC un gran numero di spettri infrarossi ad alta risoluzione ed in un ampio intervallo spettrale. L'analisi spettroscopica si avvale dell'attività di laboratorio effettuata presso l'OAC stesso. Gli obiettivi raggiunti nell'ambito di questo progetto sono:

- l'identificazione della composizione mineralogica dei grani di polvere di diverse comete appartenenti sia alla nube di Oort che alla fascia di Kuiper;
- l'identificazione della composizione chimica delle superfici di asteroidi della fascia principale;
- la determinazione delle abbondanze dei composti chimici, delle distribuzioni di dimensioni delle polveri e delle temperature dei grani e delle superfici;
- la determinazione dell'evoluzione del materiale presente nella nebulosa protosolare.

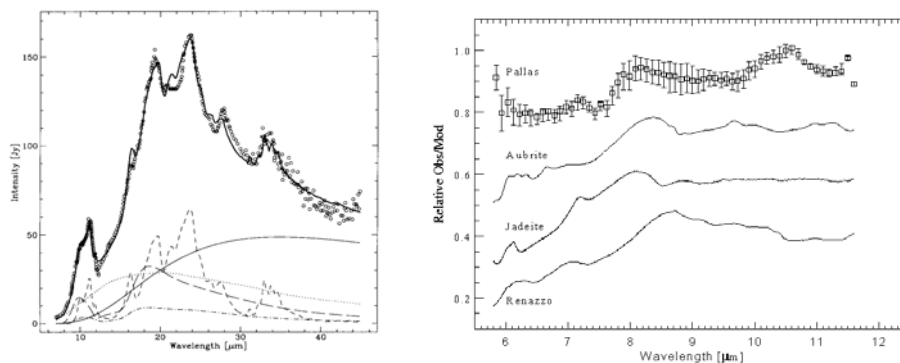


Figura 15: A sinistra, fit dello spettro ISO della cometa Hale-Bopp (*cerchi vuoti*) con una combinazione (*linea continua spessa*) di popolazioni diverse di grani di polvere: carbone amorfo (*linea a punti*), forsterite cristallina (*tratteggio breve*), olivina amorfa (*tratti e punti*) e enstatite amorfa (*tratteggio lungo*), più l'emissione di corpo nero da parte di grani grossi (*linea continua sottile*). A destra, emissività dell'asteroide Pallas, ottenuta da ISO, confrontata con gli spettri del meteorite Renazzo e di due minerali, jadeite e aubrite.

2.4 Mezzo interplanetario: IDPs e Meteoriti

Un importante contributo alla ricerca sulle origini e l'evoluzione del Sistema Solare deriva dalla analisi di campioni di materiale solido extraterrestre. Questi materiali, infatti, conservano nelle loro proprietà chimiche e fisiche indicazioni sui processi che li hanno generati e modificati durante la permanenza all'interno del Sistema Solare. I materiali extraterrestri disponibili per analisi scientifiche sono: particelle di polvere interplanetaria (IDPs) e meteoriti.

2.4.1 IDPs

Le IDPs sono piccole particelle di polvere raccolte principalmente in stratosfera. Nel prossimo futuro sarà possibile arricchire il set di campioni attualmente a disposizione raccogliendo frammenti solidi direttamente dai corpi planetari, grazie alle missioni di "sample return", come ad esempio STARDUST e MUSES-C, dirette rispettivamente verso comete ed asteroidi, e le missioni in orbita circumterrestre.

Due sono le possibili sorgenti di IDPs: asteroidi e comete di breve periodo. Particelle asteroidali sono rappresentative dei materiali che nelle prime fasi evolutive del Sistema Solare andarono a formare i planetesimi che si situano tra 2.2 e 3.3 U.A. dal Sole, nella regione della fascia principale (*main belt*) degli asteroidi. Particelle cometarie sono invece rappresentative dei materiali che nel passato andarono ad accrescere la regione della cintura di Kuiper, posta a distanze maggiori 20 UA.

Una delle principali questioni relative alle IDPs è, pertanto, l'identificazione dell'origine asteroidale o cometaria: identificazione che è possibile grazie anche allo studio della composizione mineralogiche, oltre che della morfologia.

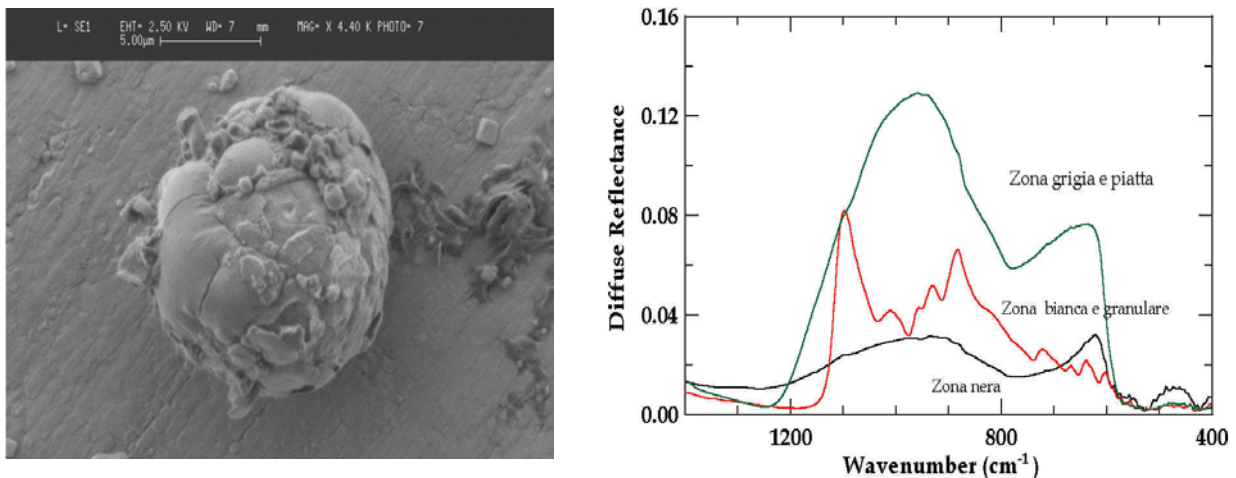


Figura 16: A sinistra, immagine FESEM di una IDP raccolta in stratosfera. L'analisi della morfologia è un primo passo verso l'identificazione della natura della particella; questa presenta segni di fusione della superficie dovuti all'ingresso in atmosfera. A destra, spettro di riflettanza diffusa su diverse zone di una meteorite marziana Zagami. Mediante la micro-spettroscopia IR è stato possibile individuare diverse fasi mineralogiche sul campione: fase vetrosa relativa alla zona grigia e piatta e alla zona nera; fase cristallina relativa alla zona bianca e granulare.

Nell'ambito di questo progetto, campioni di IDPs raccolti in stratosfera sono stati assegnati dalla NASA al Laboratorio di fisica cosmica dell'OAC in seguito alla positiva valutazione di una proposta scientifica. Inoltre, sono disponibili campioni raccolti mediante collettori di aerogel esposti in ambiente circumterrestre a bordo della stazione spaziale MIR durante l'esperimento COMET-99. Principale obiettivo del progetto è l'analisi della mineralogia e delle proprietà chimiche e fisiche allo scopo di identificare l'origine cometaria o asteroidale delle particelle. Mediante microscopia elettronica a scansione (FESEM), sono state indagate le caratteristiche morfologiche delle particelle (fig. 16, sinistra). Particelle di reale origine extraterrestre presentano tracce degli stress superficiali

dovuti all'interazione con l'atmosfera. Attualmente sono in corso l'analisi della composizione chimica, mediante rivelazione della radiazione X (EDX), e della mineralogia, mediante microspettroscopia IR.

2.4.2 Meteoriti

Le meteoriti sono corpi solidi di origine extraterrestre che raggiungono la superficie terrestre sopravvivendo al passaggio attraverso l'atmosfera. Principali sorgenti per questi corpi sono gli asteroidi; tuttavia una discreta componente è di origine planetaria (Luna e Marte). Le meteoriti di origine planetaria sono particolarmente interessanti in quanto consentono una diretta comparazione con misure a distanza o *in situ* dei rispettivi corpi progenitori.

Nel progetto, lo studio di meteoriti acondriti di origine marziana, le meteoriti SNC, è di importanza fondamentale per la comprensione della composizione mineralogica del suolo di Marte, nonché degli eventuali meccanismi di trasformazione delle rocce. A tale scopo sono in fase di studio campioni di meteoriti SNC, come ad esempio Zagami e Shergotty. Per essi sono state ottenute importanti informazioni sulle fasi mineralogiche mediante microspettroscopia IR. E' inoltre in corso l'analisi combinata tra gli spettri infrarossi e la composizione chimica ottenuta mediante EDX.

2.5 Dinamica della fotosfera solare

Lo scopo primario della ricerca sulla dinamica fotosferica condotta dal gruppo solare dell'OAC è quello di vincolare i processi che eccitano le oscillazioni globali del Sole. Il mezzo d'indagine è costituito dalle fluttuazioni di intensità (I) e velocità (V) fotosferica. Misure di I e V sono ottenute sia da dati dello strumento MDI, a bordo della missione spaziale SOHO, e della rete terrestre per l'elisismologia GONG, sia con lo strumento VAMOS, operativo in OAC. I due segnali I e V sono analizzati in modo completo, considerandone cioè potenza, differenza di fase e coerenza. L'interpretazione della variazione di I e V con le frequenze temporale e spaziale si avvale di modelli teorici ed anche della analisi di simulazioni numeriche della convezione solare e delle onde da essa

generate.

Il maggiore risultato scientifico recentemente conseguito è un modello della dinamica fotosferica, che è in grado di riprodurre i modi di oscillazione solare a bassa frequenza con un'accuratezza mai raggiunta sinora. Un esempio della qualità dell'accordo modello-dati è mostrato in figura 17. Attualmente viene confrontato il modello con le simulazioni numeriche 3-D di convezione compressibile solare ed i collaboratori americani dell'Università del New Mexico provano ad estendere il modello sviluppato in OAC ai modi di oscillazione di alta frequenza.

Per assicurare il funzionamento del VAMOS è

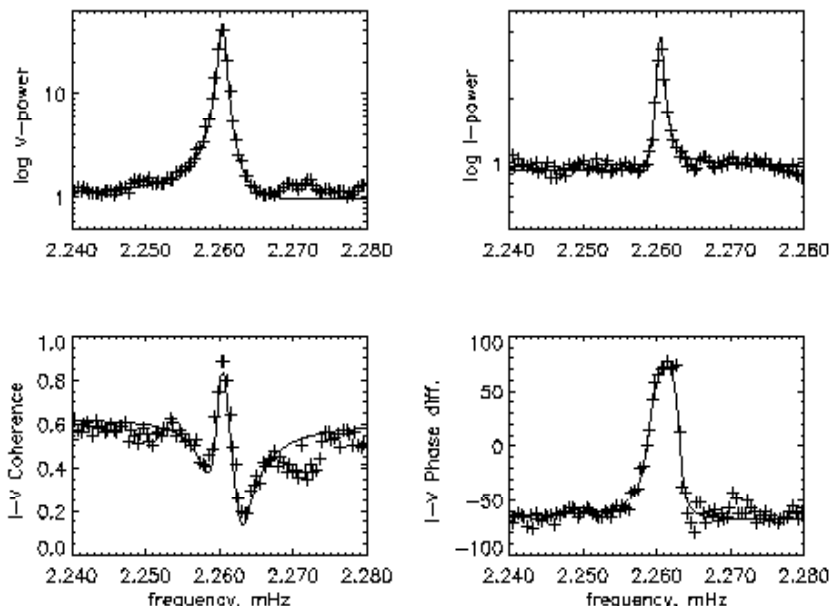


Figura 17: Confronto tra gli spettri eliosismici osservati (croci) ed il modello (linea continua) per il modo di oscillazione acustico di ordine radiale $n=10$ e grado $l=17$. I riquadri superiori si riferiscono alla potenza in V (sinistra) ed in I (destra), quelli inferiori alla coerenza (sinistra) ed alla differenza di fase (destra). I profili dei modi osservati sono spettri mediati in frequenza, provenienti dall'analisi di 9 mesi di dati GONG.

in corso di realizzazione in OAC un laboratorio *ad hoc* per la manifattura delle celle a vapori di potassio che il VAMOS adopera come filtri a banda stretta.

Un ulteriore supporto alla ricerca è fornito dalla base di dati solari ARTHEMIS, sita in OAC ed integrata nella rete nazionale SolarNet.

A questa ricerca si collega il programma CONCORDIASTRO, in collaborazione con l'Università di Nizza, ed appena approvato dal CSNA/PNRA, che si propone di installare, per la prima volta, un telescopio solare da 40cm nel sito antartico di Dome C.

2.6 Studio della dinamica e struttura di cromosfera, regione di transizione e corona solare

L'analisi spettroscopica delle strutture cromosferiche e coronali è fondamentale per stimare il flusso di massa e energia attraverso quelle regioni dell'atmosfera solare: flussi che tramite il vento solare determinano le condizioni dello spazio circumterrestre.

L'approccio adottato per lo studio delle proprietà della cromosfera e della corona solare passa attraverso l'acquisizione e l'analisi di spettri dalle regioni dell'estremo UV (EUV) all'infrarosso, e il loro confronto con spettri sintetici prodotti dal gruppo solare dell'OAC. In particolare, spettri EUV sono stati ottenuti con strumenti di SOHO (Solar Heliospheric Observatory, missione congiunta NASA/ESA) di strutture relativamente quiescenti quali protuberanze solari, e di eventi quali brillamenti solari. In quest'ultimo caso, le osservazioni sono state ottenute nell'ambito di campagne osservative internazionali, in coordinazione con altri strumenti sia a bordo di satelliti che su telescopi solari terrestri.

Nel caso di righe spettrali prodotte in condizioni in cui il trasporto radiativo è essenziale per l'interpretazione dei dati, come nel caso dell'emissione cromosferica, il metodo seguito è di confrontare spettri sintetici prodotti su una griglia di modelli di atmosfera con osservazioni ad alta risoluzione spettrale.

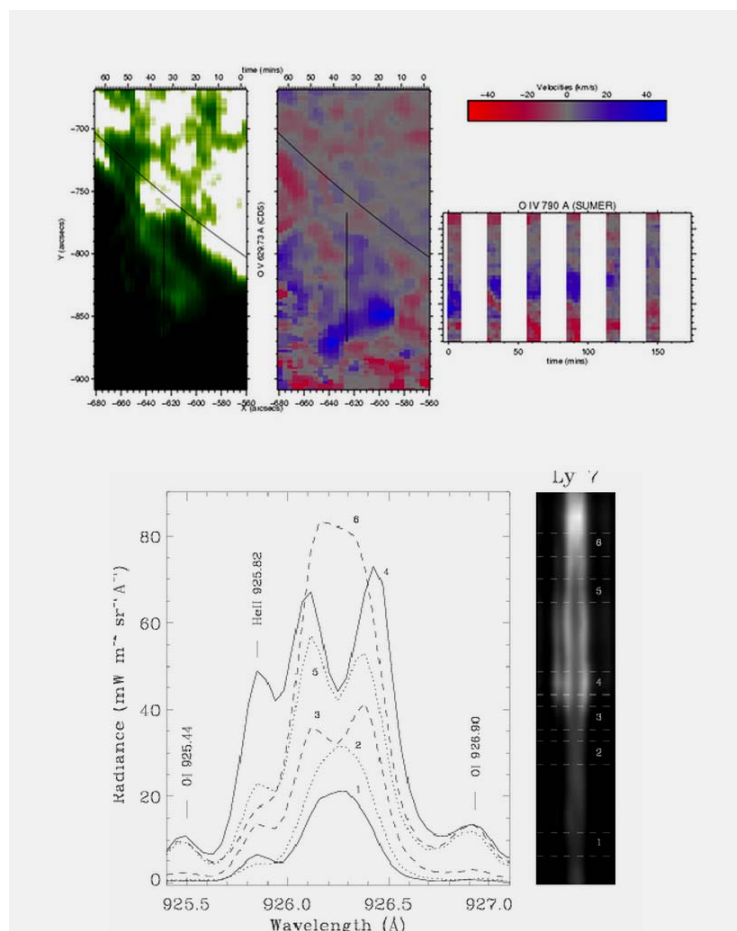


Figura 18: Spettroscopia di una protuberanza osservata con due spettrografi di SOHO, SUMER e CDS. In alto, un'immagine di una protuberanza ottenuta da spettri CDS nella riga dell'O V a 629.7 Å. La mappa di velocità è confrontata con le velocità osservate con SUMER nella riga O IV 790 Å in funzione del tempo e della posizione. In basso: profili della Lyman 7 a 926.2 Å lungo la fenditura di SUMER per la stessa protuberanza; è evidente l'autoassorbimento della riga nella regione della protuberanza.

Nel caso di spettri EUV, il trasporto radiativo è normalmente meno importante. Tuttavia, per diagnostici spettroscopici prodotti da elementi abbondanti quali l'elio o l'idrogeno, gli effetti di trasporto radiativo possono essere considerevoli. Un caso è lo spettro sia infrarosso che EUV dell'elio, al cui problema è stato dedicato un *workshop* nell'aprile 2000 presso l'OAC, ed è tuttora oggetto di analisi sia teorica che osservativa; un altro caso è la serie di Lyman dell'idrogeno osservata in alcuni dati in via di elaborazione relativi a protuberanze.

2.7 Progetto CONCORDIASTRO

Per molti anni, a partire dalla fine degli anni '70, l'Antartide è stato per la fisica solare il miglior sito al mondo dove fare osservazioni eliosismologiche. Oggi questo compito è più facilmente svolto da reti di strumenti a diverse longitudini. Tuttavia il continente ghiacciato, e Dome C in particolare (sito della stazione scientifica permanente franco-italiana CONCORDIA attualmente in fase di costruzione; figura 19), sono ancora in grado di attrarre l'osservatore solare in virtù della opportunità unica di osservare nell'infrarosso, dove il cielo antartico è eccezionalmente trasparente, e, di più, con la promessa di lunghi periodi di osservazione del Sole ad alta risoluzione spaziale.



Figura 19: La stazione CONCORDIA in costruzione a Dome C, in Antartide (per cortesia del PNRA).

In molti casi nei quali il sito antartico è in competizione con lo spazio, l'Antartide sarà la scelta vincente se sarà disponibile strumentazione per scopi generali. Infatti, apparati strumentali con varie configurazioni facilmente intercambiabili, come spesso richiesto in fisica solare, non saranno probabilmente possibili nello spazio nel breve e medio termine. Inoltre, l'acquisizione simultanea di osservazioni ad alta risoluzione spaziale e a Sole intero produce necessariamente un'enorme quantità di dati, che possono essere ricevuti solo con grandi difficoltà da strumentazione in volo.

Il progetto CONCORDIASTRO, che vede coinvolti i ricercatori solari dell'OAC, mira a verificare la qualità dell'atmosfera al sito del Dome C dal punto di vista dell'osservazione del Sole

(il cosiddetto *seeing* solare) mediante l'installazione di un telescopio da 40 cm, disegnato per acquisire immagini sia ad alta risoluzione spaziale sia a Sole intero, in intervalli spettrali selezionati. Questo programma solare è parte del progetto franco-italiano CONCORDIASTRO per la qualificazione astronomica di Dome C. Se l'aspettativa di condizioni eccellenti di seeing sarà confermata, le osservazioni proposte potranno produrre dati di alto interesse scientifico. Il telescopio solare a Dome C verrà poi messo a disposizione della comunità internazionale nel quadro del programma di collaborazione scientifica italo-francese CONCORDIA.



Cannocchiale di Nairne & Blunt – Londra 1774