# STUDIO PRELIMINARE DI UN PROTOTIPO DI STRUMENTO DA VOLO PER LA RILEVAZIONE DI IMMAGINI DOPPLER DEL SOLE

Berrilli F.[1], Bruno R.[2], Egidi A.

ROM2F/035/87 Novembre-1987

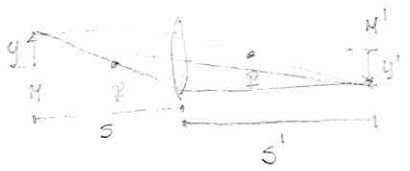
1) Titolare di un incarico di ricerca presso l'Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario-CNR (Frascati)
2) Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario-CNR (Frascati)

Questo progetto e' finanziato dal Piano Spaziale Nazionale del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

$hc = 12{,}4\ keV \cdot Å$

$1\,eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J$

$hc = 12400 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}$




$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

## RIASSUNTO

Lo scopo di questa nota e' quello di introdurre il lettore allo studio delle oscillazioni solari come mezzo di indagine della struttura e dinamica dell'interno del sole. Questa tecnica, sorta negli anni sessanta, e' comunemente denominata "Eliosismologia" in quanto simile alla sismologia terrestre anche se i fenomeni che determinano libere oscillazioni nel Sole e nella terra sono di differente natura.

Passeremo in rassegna i fondamenti su cui si basa l'Eliosismologia, i principali progressi gia' raggiunti grazie a questa tecnica ed i problemi piu' importanti che essa e' potenzialmente in grado di risolvere. Verra' inoltre brevemente illustrata sia la tecnica basata sull'effetto Doppler adottata per la rivelazione delle oscillazioni solari sia il funzionamento del filtro magneto-ottico (MOF) che permette di rilevare immagini Doppler di un oggetto in movimento, ideato e realizzato da A. Cacciani del Dipartimento di Fisica dell'Universita' "La Sapienza".

L'ultima parte della nota e' dedicata al progetto, in fase di realizzazione, di un dispositivo ottico, per l'acquisizione di immagini solari, che servira' da prototipo per uso spaziale e stazione di raccolta dati per la seconda Universita' di Roma.

## 1. INTRODUZIONE

Le attuali conoscenze sul Sole sono in buona parte dovute allo studio della fotosfera. Dalle osservazioni delle macchie fotosferiche sappiamo infatti che il Sole ruota con un periodo di circa 25 giorni all'equatore e che tale periodo aumenta spostandosi verso i poli; che la granulazione e supergranulazione sono effetti evidenti di intensi moti turbolenti che si ritiene abbiano origine molto in profondita'; che perfino l'esistenza di un forte campo magnetico superficiale e le sue variazioni con il ciclo solare sono dovuti a fenomeni da ricercarsi all'interno della stella. La fotosfera risulta quindi essere la regione del Sole dove si manifestano a noi numerosi fenomeni di origine interna. Risulta evidente che lo studio di uno strato superficiale del Sole di spessore inferiore ad un millesimo dell'intero raggio, come e' la fotosfera, non puo' dare delle risposte complete ai quesiti posti dallo studio dei numerosi e complessi meccanismi che governano i fenomeni menzionati in precedenza. Occorre quindi indagare gli strati piu' interni non accessibili a misurazioni dirette. Tale compito, dagli inizi degli anni sessanta (Leighton et al., 1960), e' stato devoluto allo studio delle distribuzioni di velocita' dei gas alla superficie del sole, in altre parole, allo studio delle oscillazioni della superficie solare. Queste oscillazioni sono l'effetto di onde di pressione e di moti di tipo idrostatico che animano l'interno del sole. Alle alte frequenze (periodi compresi fra 3 minuti ed 1 ora) lo spettro delle fluttuazioni e' dominato da onde acustiche, denominate "modi p", prodotte da onde di pressione (Ulrich, 1970, Leibacher and Stein,

1971). Alle basse frequenze (periodi superiori ad 1 ora) dominano onde di gravita,' denominate "modi g", prodotte da oscillazioni adiabatiche di elementi di materia causate da forze di tipo idrostatico. I modi p sono quelli piu' facilmente risolvibili e quindi sara' su tali modi che ci soffermeremo nel seguito. Le onde acustiche una volta prodotte si propagano all'interno del Sole come se esso fosse una cavita' risonante, dando luogo ad onde di tipo stazionario. Le pareti di questa cavita' sono rappresentate da gradienti di densita' e temperatura in grado di riflettere o rifrangere tali onde. La zona piu' esterna dove tali onde vengono riflesse e' situata poco al di sotto della fotosfera, dove vi e' un forte gradiente di densita'. Il fronte di un' onda riflessa verso il basso in direzione obliqua rispetto al raggio del Sole subisce delle deviazioni dovute al gradiente radiale della temperatura. Infatti la parte del fronte d'onda che viaggia a profondita' maggiori sperimenta temperature maggiori e di conseguenza aumenta la sua velocita' di propagazione. Tale fenomeno comporta una rifrazione che incurva progressivamente il fronte d'onda fino a dirigerlo nuovamente verso la fotosfera dove verra' nuovamente riflesso verso l'interno del sole. In tale modo una perturbazione acustica viaggia all'interno del Sole al di sotto della fotosfera. Ogni perturbazione di questo tipo e' dunque confinata in una cavita' risonante che esclude sempre una regione centrale del sole. Onde riflesse in superficie meno obliquamente raggiungono strati piu' interni del Sole e' vengono confinate in cavita' risonanti piu' profonde. Queste onde, intrappolate nelle cavita', interferiscono

costruttivamente fra di loro dando luogo a risonanze che si manifestano come oscillazioni della superficie solare. Nel complesso si puo' affermare che a lunghezze d'onda superficiali piu' brevi corrispondono perturbazioni confinate in cavita' meno profonde. Si comprende dunque come le oscillazioni solari costituiscano un valido mezzo per scandagliare a diverse profondita' quelle regioni del Sole che non sono accessibili a misure dirette.

## 2. PROBLEMATICA

Le oscillazioni solari si sono rivelate un potente mezzo di indagine che permette di determinare parametri di fondamentale importanza per verificare la validita' degli attuali modelli di evoluzione stellare. Uno dei primi risultati ottenuti e' stata la determinazione dello spessore della zona di convezione che in precedenza si pensava occupasse 1/10 del raggio del Sole e che Ulrich and Rhodes (1977) and Gough (1977) stabilirono essere 1/3. Questo risultato e' di notevole importanza per le implicazioni che esso ha sulla supposta percentuale di elio nel Sole e quindi sul problema del flusso dei neutrini solari. Altri risultati preliminari hanno fornito indicazioni dell'esistenza di una rotazione differenziale interna, dell'esistenza di celle convettive situate poco al di sotto della superficie di dimensioni dell'ordine di 150 milioni di metri ed animate da velocita' dell'ordine di 100 m/sec ed hanno permesso di stabilire la

correttezza dei profili di densita' e temperatura dei modelli teorici, nonche' una stima dell'abbondanza iniziale di elio. Questi problemi ed altri come ad esempio la determinazione dell' ipotetico momento di quadrupolo del campo gravitazionale solare, la verifica della teoria dinamo e del ciclo undecennale del campo magnetico solare, l'esistenza di un forte campo magnetico al centro del Sole (l'intensita' sarebbe di alcuni megagauss) residuo di un campo primordiale possono essere risolti grazie allo studio delle oscillazioni solari.

Nel paragrafo che segue viene descritto uno dei metodi piu' in uso nella rivelazione delle oscillazioni superficiali del sole.

## 3. RIVELAZIONE DELLE OSCILLAZIONI SOLARI

### 3.1 L'USO DELL'EFFETTO DOPPLER

L'effetto dei modi acustici, confinati in cavita' risonanti all'interno del sole, si manifesta come oscillazioni essenzialmente radiali della superficie solare rivelabili mediante lo spostamento Doppler che esse inducono nelle righe di assorbimento solari. Uno spostamento verso il blu o verso il rosso di tali righe emesse da una data regione della superficie indica che quella regione si sta muovendo verso l'osservatore, o allontanandosi da esso, rispettivamente. Costruendo quindi dei dopplergrammi di tutta la superficie solare e' possibile individuare, ad un dato istante, quali regioni superficiali

si stanno espandendo e quali contraendo. Spettri di frequenza delle oscillazioni a 5 minuti (le piu' comunemente osservate) hanno dimostrato che i moti derivano dalla sovrapposizione di molti modi i cui periodi variano tra 3 e 6 minuti e le cui lunghezze d'onda superficiali variano tra 1000 e 4.5 milioni di chilometri, ossia fra la dimensione media dei granuli e l'intera circonferenza solare. Inoltre e' stato evidenziato che mentre la velocita' radiale dei singoli modi e' di poche decine di metri al secondo, una loro sovrapposizione stocastica puo' raggiungere velocita' di alcune centinaia di metri al secondo. Risulta quindi evidente che per rilevare lo spostamento Doppler che un singolo modo provoca in superficie occorre uno spettrografo estremamente sensibile e stabile nel tempo. Gli spettrografi che attualmente danno i risultati migliori sono quelli con cella a gas di sodio o potassio ideati da A. Cacciani (Agnelli et al. 1975, Cacciani e Fofi 1978). Il loro funzionamento e' basato sul confronto delle righe spettrali di assorbimento di uno di questi due elementi allo stato gassoso contenuto in un'ampolla di vetro con quelle prodotte dagli atomi dello stesso elemento in moto sulla regione solare che si sta osservando. Tali celle, comunemente denominate "filtri magneto-ottici" o piu' brevemente "MOF", vengono utilizzate fin dal 1983 con ottimi risultati su di uno strumento per la rilevazione delle oscillazioni solari installato al Mt. Wilson Observatory (USA). Nel successivo paragrafo viene schematicamente illustrato il funzionamento di questo filtro.

## 3.2 IL FILTRO MAGNETO-OTTICO (MOF)

Lo schema di massima del filtro magneto-ottico e' mostrato in Figura 1. Esso consiste di due parti: la "Filter Section" e la "Wing Selector Section" (Agnelli, Cacciani and Fofi 1975, Cacciani and Fofi 1978). La "Filter Section" consiste di una cella contenente vapori di Na immersi in un campo magnetico come mostrato in figura. All'ingresso ed all'uscita della cella vi sono due polarizzatori incrociati.

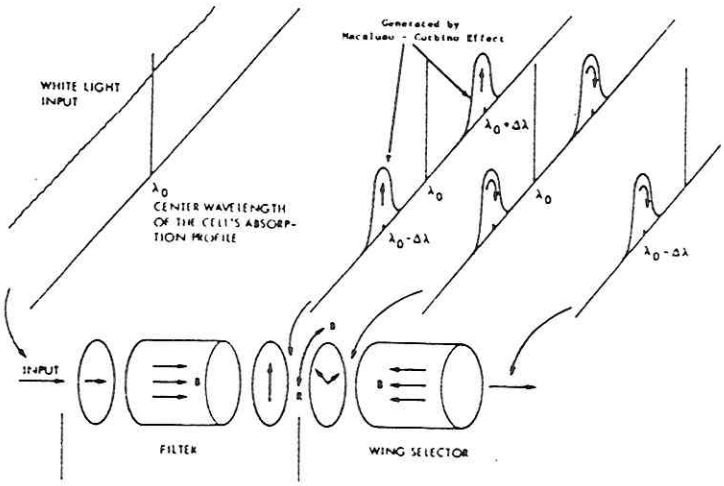



Figura 1. Schema di funzionamento del filtro magneto-ottico (Solar oscillations Imager, nota tecnica del JPL, 1987)

La radiazione che penetra la cella viene linearmente polarizzata dal primo polarizzatore e gran parte di essa viene ulteriormente estinta all'uscita dal secondo polarizzatore. Tuttavia, in seguito all'effetto Zeeman dovuto al campo magnetico che genera due righe di assorbimento equispaziate dalla riga iniziale ed all'effetto Macaluso-Corbino che produce una rotazione nel piano di polarizzazione di tali righe, all'uscita dal secondo polarizzatore si avranno strette bande di trasmissione linearmente polarizzate nell'ala blu ed in quella rossa. Una

lamina a quarto d'onda posta dopo il secondo polarizzatore trasforma le due componenti da linearmente polarizzate a circolarmente polarizzate. Un secondo filtro, denominato "Wing Selector", e costituito anch'esso da vapori di Na sempre immersi in un campo magnetico, assorbira' una delle componenti lasciando passare l'altra. Risultato di tutto cio' sara' la formazione di una stretta banda di trasmissione situata sull'ala rossa oppure su quella blu della linea di assorbimento solare. A questo punto la differenza di intensita' risultante da una immagine di una zona del disco solare presa nell'ala blu e di un'immagine della stessa zona ottenuta nell'ala rossa fornira' una misura del verso in cui quella regione si sta muovendo rispetto all'osservatore lungo la linea di vista.

Questo stesso tipo di sistema e' in corso di realizzazione presso la seconda universita' di Roma. Esso e' parte integrante di uno strumento per la rilevazione delle oscillazioni solari in costruzione presso la stessa università ed il cui sistema ottico viene qui di seguito illustrato e discusso.

## 4. IL SISTEMA OTTICO

### 4.1. DESCRIZIONE GENERALE

In figura 2 e' rappresentato, in forma schematica, il sistema ottico dello strumento per l'acquisizione di immagini Doppler del disco

solare che e' in fase di realizzazione.

L'obiettivo (O) e' costituito da un doppietto convenzionale di f:12.5. Per ridurre le dimensioni lineari dello strumento e per consentire un allineamento fine del fascio si e' deciso di piegare due volte il cammino ottico; a questo scopo sono stati usati due specchi di rinvio piani (S1,S2).

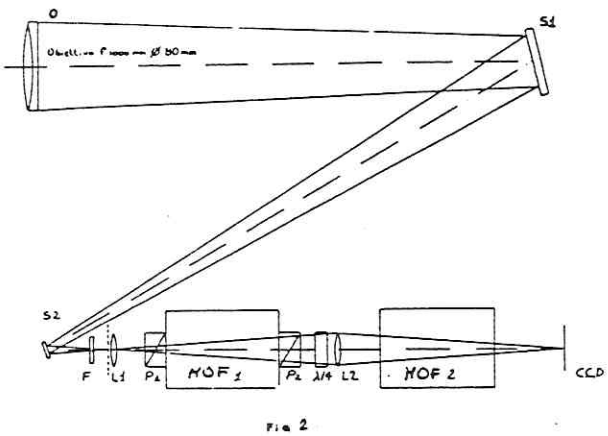



Figura 2. Sistema ottico in forma schematica.

Il piano del secondo specchio (S2), attualmente allineabile micrometricamente, sara' in una seconda versione controllabile in modo automatico allo scopo di rendere stabile l'immagine del Sole sul piano della CCD. Seguono i due specchi una lente di campo (L1) ed una lente (L2) di re-imaging.

## 4.2 CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA

L'obiettivo ha un diametro di 80 mm ed una focale f=1000 mm. Il fascio prodotto viaggia costantemente a 60 mm dal piano dello strumento.

La scala del telescopio, data dalla relazione:

Scala (arcsec/mm)=206100/f(mm)

e' pari a 206 arcsec/mm; poiche' il diametro apparente del Sole e' di circa 32' il diametro della sua immagine sul piano focale e' di 9.2 mm.

La prima lente (L1), di f=150mm, e' posta vicino al piano del telescopio, non esattamente sul piano per evitare che depositi di polvere possano influire sull'immagine del Sole, e forma, circa 180 mm dopo, un'immagine dell'obiettivo di ingresso. E' in questa posizione che troviamo la seconda lente (L2) che, dovendo formare un'immagine del disco solare di 7.5 mm di diametro sul piano della CCD, dovra' avere una focale di 80 mm. Abbiamo infatti che affinche' risulti un ingrandimento pari a 7.5/9.2 = 0.81 = 144/180 deve valere:

$$1/180 + 1/144 = 1/80$$

In questa configurazione ottica tutti i raggi provenienti dall'immagine del disco solare sono confinati all'interno di un cilindro del diametro di circa 10 mm delimitato dalla stessa immagine del Sole e da quella dell'obiettivo d'ingresso.

**Note le dimensioni del disco solare sulla CCD e note le dimensioni del singolo elemento del rivelatore ricaviamo che ogni pixel coprira' un'area di cielo pari a circa 6.4arcsec$^2$ che corrispondono ad una risoluzione lineare massima sul Sole di circa 4600 Km.**

Volendo ora valutare il numero di fotoni incidenti ogni secondo sul singolo elemento della CCD applichiamo la formula riportata su:
"Applicazione del MOF a stelle di tipo spettrale solare - Pegrano".

$$Nf = A \cdot R^n \cdot T^m \cdot A(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot D \cdot n(\lambda) \text{ fotoni/s}$$

dove:

A area telescopio ($cm^2$)

R riflessivita" specchi, n numero specchi

T trasparenza delle lenti, m numero lenti

$A(\lambda)$ trasparenza atmosferica $K(\lambda)$ trasparenza dei filtri (interferenziale + MOF)

D intervallo lunghezza d'onda selezionato (Å)

$n(\lambda)$ flusso luminoso dal Sole in fotoni/$cm^2$·Å·s

Per il nostro sistema otteniamo: $Nf=0.013\ n(\lambda)$. Per la riga del Sodio il flusso atteso e' dell'ordine di $10^{11}$ fotoni/s. Considerando per l'immagine del Sole un'area di circa 44 $mm^2$ e per il singolo elemento una dimensione di 25x25 $\mu m$ abbiamo $10^6$ fotoni/s su ogni pixel. Questo corrisponde ad una potenza incidente dell'ordine del decimo di microwatt.

# 5. DISEGNO MECCANICO

## 5.1 L'INSEGUIMENTO

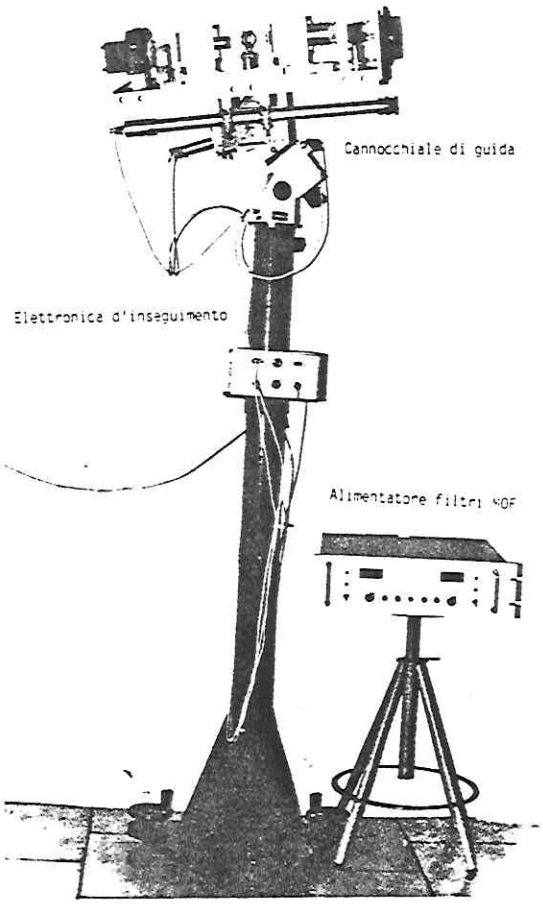



Figura 3. Veduta d'insieme dello strumento

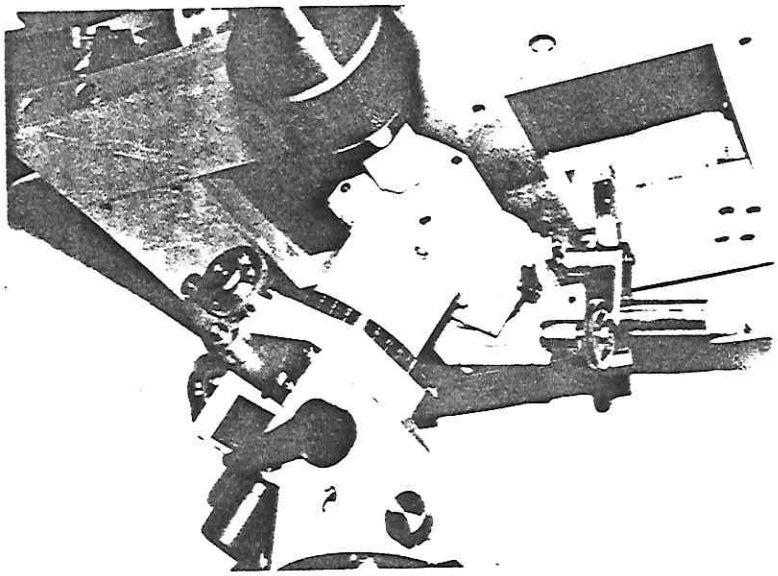


Figura 4. Particolare della montatura equatoriale in cui sono visibili i motori di ascensione retta e declinazione, le demoltipliche e gli ingranaggi a recupero di gioco.

Lo strumento e' stato fissato ad una montatura equatoriale a colonna di tipo tradizionale (Fig.3). Si e' adottata questa soluzione, meccanicamente piu' complessa dell'uso di un celostato che guidasse il fascio proveniente dal Sole su di un'ottica montata su banco, per

evitare che l'immagine del disco solare , nel corso della misura, ruoti sul piano della CCD.

Un cannocchiale di guida di f:17, sul cui piano focale e' montato un fotodiodo a quadranti, consente un inseguimento attivo del Sole per mezzo di un'elettronica di comando per i due motori, demoltiplicati, della declinazione e dell'ascensione retta (Fig.4). Questi trasmettono il moto per mezzo di ingranaggi a recupero di gioco. Lo schema dell'elettronica di comando e' riportato in Figura 5.

## 5.2 IL SUPPORTO PER LE OTTICHE

Il disegno meccanico e' guidato da due condizioni: uno sviluppo lineare contenuto, per ridurre flessioni ed ingombro, ed un peso non eccessivo, per ridurre i momenti meccanici sulla struttura.

Del primo punto si e' discusso nel capitolo dell'ottica (specchi di rinvio). Per quanto concerne la seconda condizione si e' deciso di realizzare il supporto meccanico delle ottiche utilizzando degli scatolati in anticorodal larghi 10 cm, alti 3 cm e dello spessore di 2 mm. In questo modo la struttura, pur mantenendo ottime qualita' di rigidita', risulta estremamente leggera. Il piano cosi' realizzato (Fig.6a-b) ha le dimensioni di 57x37 cm ed un peso complessivo non superiore ad 1 Kg. L'obiettivo trova alloggio in un barilotto fissato alla parete anteriore della piastra per mezzo di tre viti calanti che ne consentono l'allineamento. Gli specchi sono montati su supporti leggeri direttamente ancorati al piano porta ottiche.

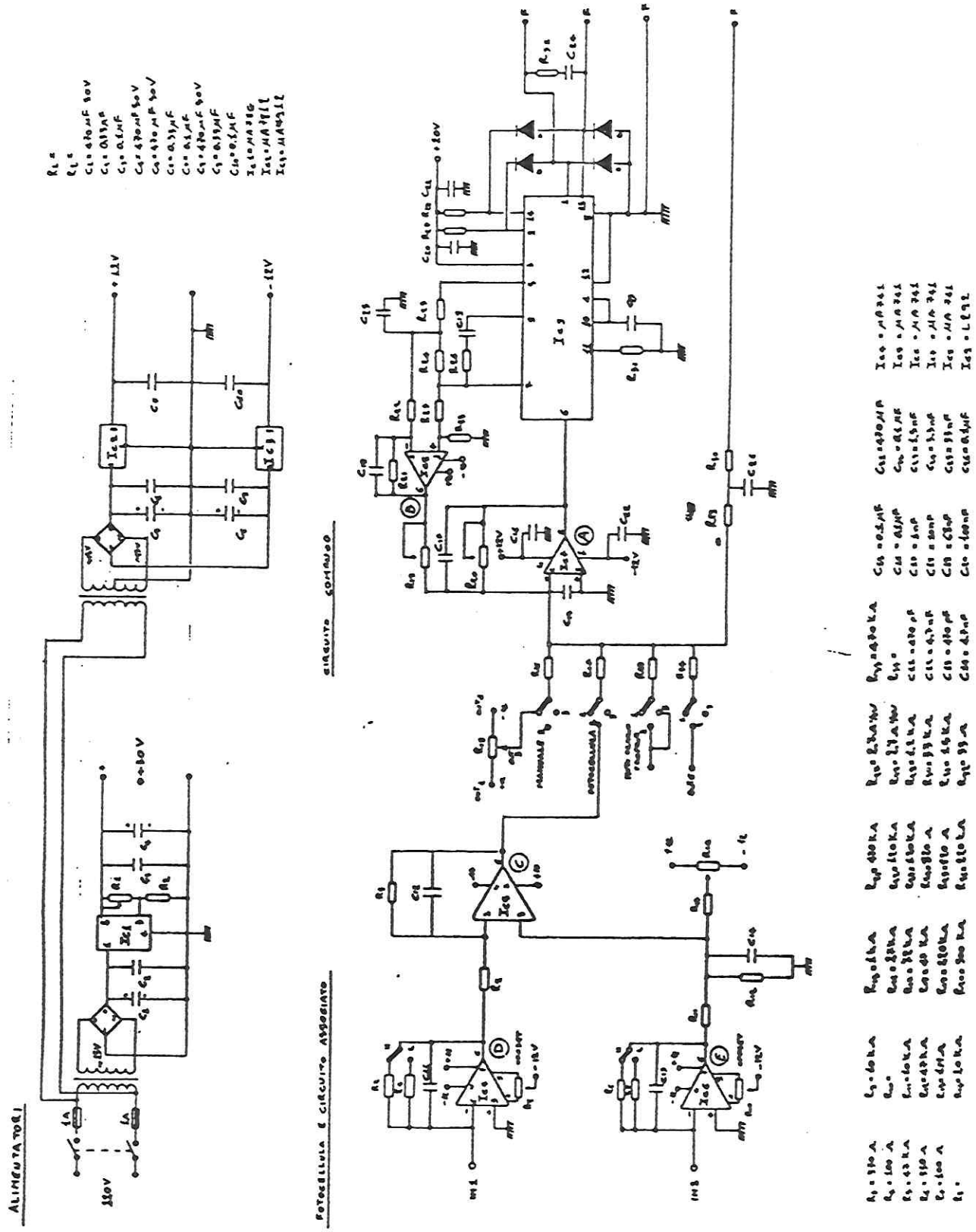
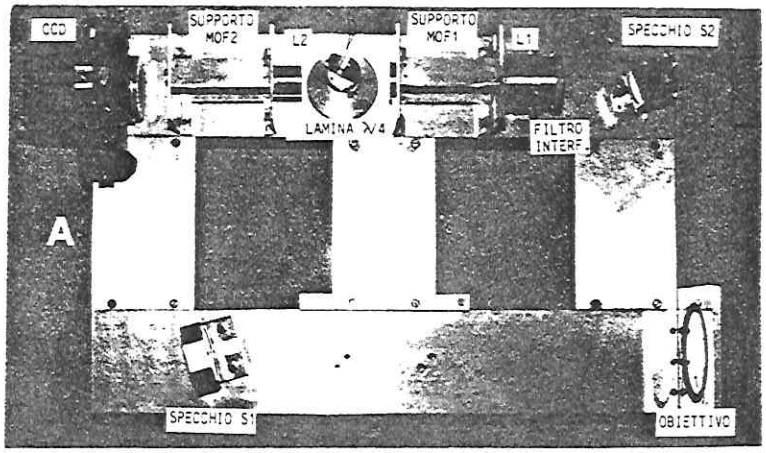



Figura 5. Elettronica di comando per l'inseguimento attivo del sole.

La lente di campo, il filtro interferenziale F a banda stretta (30Å) ed il primo filtro magneto-ottico MOF1, che comprende due polarizzatori lineari P1 e P2, sono alloggiati in una montatura unica. Questa, oltre a contenere al suo interno l'ampolla di vetro ed i magneti, permette un posizionamento micrometrico dei polarizzatori ed un aggiustaggio fine, per mezzo di un tubo telescopico, della posizione della lente di campo. Un secondo supporto in anticorodal contiene la lente di re-imaging ed il secondo filtro magneto-ottico MOF2.



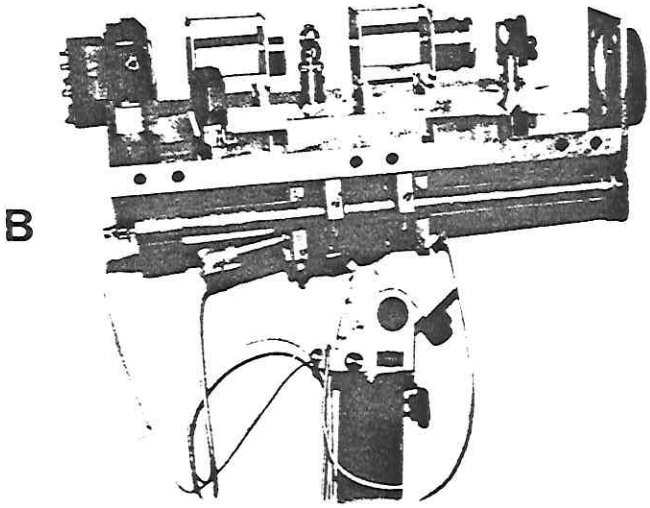




Figura 6A. Veduta dall'alto della piastra porta-ottiche.

Figura 6B. Veduta laterale della piastra porta-ottiche e colonna di supporto.

La lamina a quarto d'onda, posta tra i due MOF, e' montata su un supporto ruotante attorno al suo diametro in modo tale che il secondo MOF possa selezionare alternativamente, ad ogni mezzo giro, le ali rosse e blu della riga di cui si vuole determinare lo spostamento Doppler. Il sistema e' mosso da un micro-motore in d.c. con bloccaggio meccanico.

La CCD infine trova alloggio all'interno di un corpo Nikon (Fig.7) che, oltre a svolgere la funzione di riparo dalla luce diffusa, permette di usare l'otturatore a comando elettromagnetico sia come vero e proprio otturatore, tra un'immagine e l'altra, sia come elemento di protezione nel caso in cui la soglia di radiazione incidente superi un valore di sicurezza per il rivelatore.

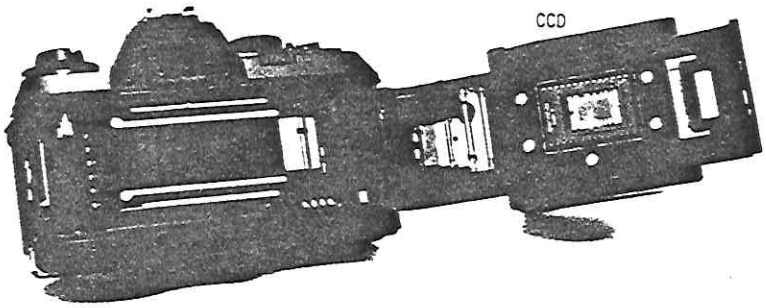



Figura 7. Corpo macchina Nikon ed alloggio CCD

Tutte le ottiche interne sono protette con uno schermo dalla radiazione diffusa mentre l'intero strumento e' protetto da un carter in allumino leggero.

## 6. PROGETTO DI MASSIMA PER UNO STRUMENTO A DOPPIO CANALE OTTICO

Ogni misura astrofisica prodotta a terra risente della presenza dell'atmosfera. Nel caso delle oscillazioni solari particolarmente importante e' l'effetto introdotto dal "seeing" che, causato da moti turbolenti atmosferici, produce tremolio,distorsione e sfocamento dell'immagine nel campo di vista del telescopio influenzando la potenza associata ai vari modi (Noyes R. W. e Rhodes E. J., 1984).

Una possibile via per eliminare questo problema, ed effetti eventualmente introdotti da "drift" strumentali, consiste nell'acquisire contemporaneamente le due immagini, blu e rossa, del disco solare. A questo scopo si e' pensato di progettare un sistema a doppio canale ottico nel quale le due immagini del Sole cadessero simultaneamente sulla CCD.

Il progetto, mostrato in Fig.8, mantiene un singolo obiettivo e divide il fascio solo dopo che questo ha superato il filtro interferenziale F, il MOF1, i due polarizzatori lineari P1 e P2 e la lente di campo L1.

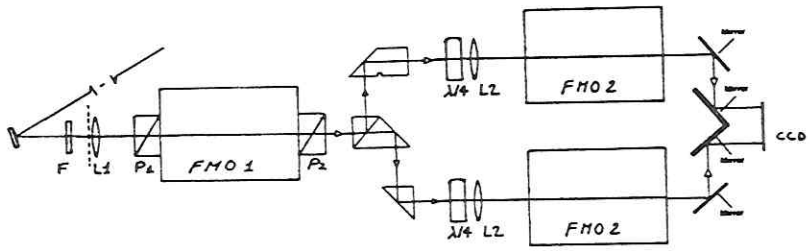



Figura 8. Sistema ottico in forma schematica.

Quest'ultima deve fornire un' immagine dell'obiettivo ad una distanza tale da consentire il montaggio dell'ottica di divisione. Volendo mantenere il diametro maggiore del cono prodotto dal fascio ottico approssimativamente di 15 mm, dobbiamo usare una lente di campo con f=200 mm; in questo modo l'immagine dell'obiettivo, a 250 mm da L1, ha un diametro di 16 mm. La soluzione scelta per la divisione del fascio, che permette un progetto simmetrico, e' quella usata per la realizzazione di microscopi stereoscopici; in questa configurazione il cammino ottico

per ambedue i bracci e' lo stesso cosi' come la luminosita' delle due immagini prodotte. Nel montare le due lenti di re-imaging si dovra' tener conto della variazione di cammino ottico prodotta dal vetro che introdurra' una traslazione del piano delle immagini. Questa variazione ($\Delta$) dipende dallo spessore del vetro (d) e dall'indice di rifrazione relativo $n_{12}$:

$$\Delta = d \cdot (1 - 1/n_{12})$$

Per consentire la sistemazione, in parallelo, dei due MOF che selezionano le ali della "riga", la distanza tra i fasci, dati gli attuali standard costruttivi dei filtri, non potra' essere inferiore a 80 mm.

Il doppio cammino ottico consente di eliminare l'elemento mobile su cui era montata la lamina a quarto d'onda; in questo disegno le lamine sono infatti due, una per ciascun fascio, e sono montate su supporti fissi. Al fine di formare sulla CCD due immagini vicine si usa un sistema a coppie di specchi piani che segue i due MOF2. Le dimensioni della CCD impongono un diametro massimo per la singola immagine del Sole di 6.5 mm, ne segue per le lenti di re-imaging una focale di 105 mm ed una distanza CCD-L2 di 178 mm.

## Bibliografia

Agnelli A., Cacciani A. e Fofi M.,Solar Phys., 44, 509, 1975

Cacciani A. e Fofi M.,Solar Phys., 59, 179, 1978

Gough D. O.,The energy balance and Hydrodynamics of the solar chromosphere and corona, Editori: R. M. Bonnet e P. Delache, p.3, 1977

Leibacher W. e Stein R. F.,Astrophys. Lett., 7, 191, 1971

Leighton R. B.,Proc. IAU Symp., 12, 321, 1960

Noyes R. W. e Rhodes E. J. Jr., Probing the depth of a star: the study of solar oscillations from space. Report NASA-SWG on the study of solar oscillations from space, p.23, 1984.

Pegrano M.,1986, (comunicazione privata)

Ulrich R. K.,Astropys. J., 162, 993, 1970

Ulrich R. K. e Rhodes E. J., Jr.,Astrophys. J., 218, 521, 1977

Si ringrazia F. Mariani per una lettura critica del manoscritto.