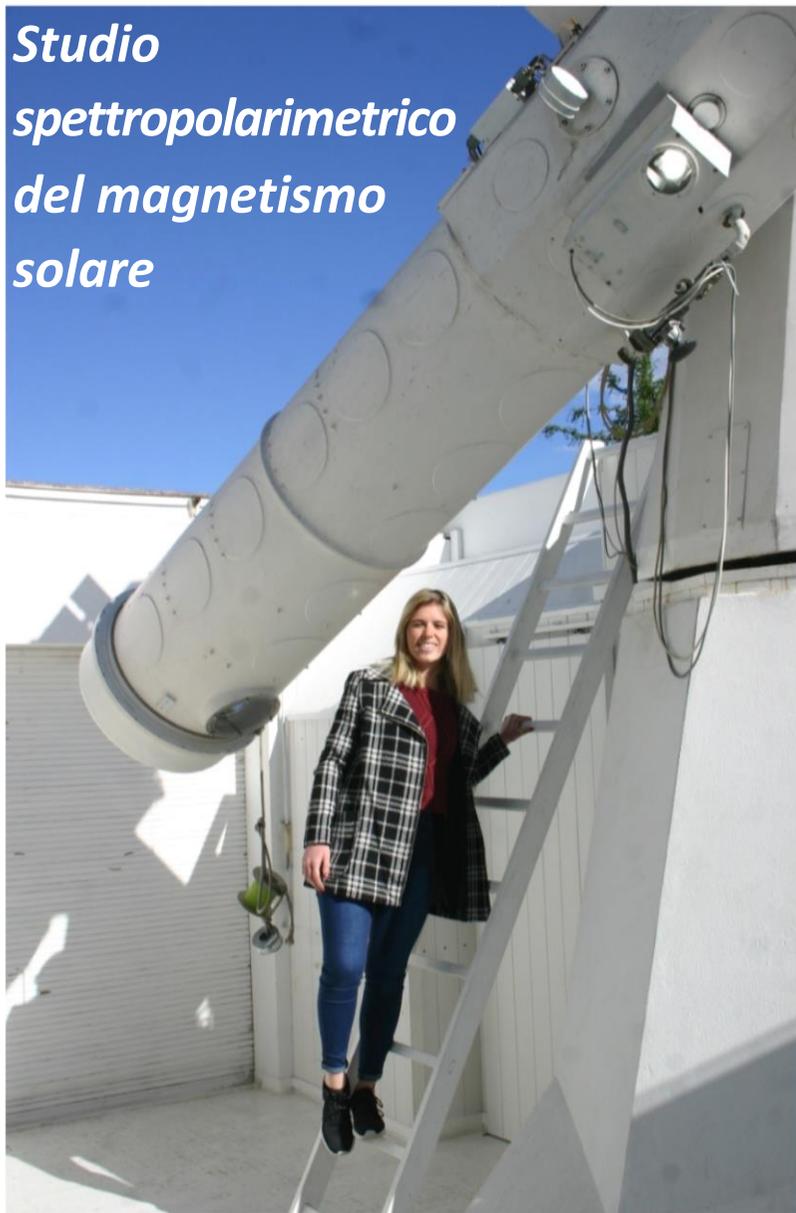


*Studio
spettropolarimetrico
del magnetismo
solare*



DI KAROLA TALAMONA

Indice

- Introduzione
- Polarizzazione della luce
- Parametri di Stokes
- Effetto Zeeman
- Effetto Hanle
- Studio spettropolarimetrico del campo magnetico solare
- Misure spettro polarimetriche eseguite all'IRSOL con ZIMPOL
- Dati ricavabili dalle misure
- Sviluppi delle misure spettropolarimetriche all'IRSOL
- Space Weather
- Conclusione
- Ringraziamenti
- Riferimenti bibliografici
- Bibliografia e sitografia
- Fonti delle immagini

Introduzione

Nell'ultimo anno del corso di studi di Liceo Scientifico ho sentito l'esigenza personale di realizzare un lavoro di carattere veramente scientifico, di vivere un'esperienza che forse non mi si presenterà più in futuro. L'occasione per concretizzare questa mia aspirazione mi è stata offerta dallo stesso Istituto Scolastico che frequento. Da oltre sette anni presso l'Istituto Superiore "Valceresio" opera infatti un Osservatorio solare inserito in un network mondiale di Osservatori solari gestito dal SIDC (Solar Influences and Data Analysis Center) presso l'Osservatorio Reale del Belgio a Bruxelles. Si tratta di una rete di circa 70-80 Osservatori sparsi in tutto il mondo che concorrono alla determinazione di un parametro fondamentale nello studio dell'attività solare, detto Numero di Wolf, recentemente ribattezzato "Sunspot Number" dallo stesso SIDC. Ho avuto l'opportunità, a partire dal terzo anno del mio corso di studi, di operare in questo Osservatorio grazie ad un progetto formativo organizzato dall'Istituto.

Mi sono resa quindi conto che, oltre al conteggio delle macchie solari, attività comunque fondamentale e di base per qualunque altra indagine scientifica sulla nostra Stella, esistono diversi altri ambiti di ricerca che riguardano il Sole. Quello che mi ha maggiormente attratto è la Spettropolarimetria Solare, che richiede metodi di indagine e strumenti che il nostro modesto Osservatorio, se pur importante nella sua collocazione logistica all'interno del SIDC, di certo non possiede.

Però il nostro Osservatorio ha, sin dal momento della sua nascita nel 2008, sviluppato un forte legame di collaborazione con due dei centri di studio del Sole più importanti del mondo: la Specola Solare Ticinese di Locarno Monti e l'IRSOL (Istituto di Ricerche Solari Locarno), che operano in Svizzera, nel vicino e confinante Canton Ticino, sulle alture che sovrastano il Lago Maggiore presso la città di Locarno. Il primo è importante in quanto funge da stazione di

riferimento (Pilot Station) per quanto riguarda i complessi calcoli di elaborazione dei dati che pervengono giornalmente al SIDC da parte degli Osservatori che fanno parte del network citato.

Nel secondo invece si trova un strumento, chiamato ZIMPOL (Zurich Imaging Polarimeter), giunto alla sua terza generazione e considerato il miglior polarimetro operante nel mondo, che lavora in coppia con uno spettrografo Czerny-Tuner. Grazie a questo legame di collaborazione mi è stato possibile, dopo una necessaria fase di apprendimento di concetti di base che esulano dai programmi curriculari del mio corso di studi e che quindi ho dovuto approfondire e sviluppare personalmente, seguire una serie di misure effettuate con ZIMPOL presso l'IRSOL che mi hanno permesso di comprendere e determinare gli elementi necessari all'analisi della polarizzazione della luce diffusa al lembo solare interpretandoli in termini di effetto Zeeman ed effetto Hanle, che sono illustrati nel testo. Questi elementi sono detti Parametri di Stokes, componenti di un quadrivettore che descrive lo stato di polarizzazione di un'onda elettromagnetica monocromatica. Ideale risultato finale di questo tipo di indagine è la determinazione indiretta dell'intensità del campo magnetico solare, che è il vero "motore" dell'attività solare.

È ormai infatti chiaro che il Sole è una immensa dinamo magnetica, che trae la sua energia dalla propria rotazione e dalla completa inversione, nell'arco di circa 22 anni, della polarità del suo campo magnetico globale. È proprio lo studio della dinamo solare che ha permesso di interpretare con un modello ampiamente riconosciuto come attendibile, detto modello di Babcock-Leighton, l'origine del ciclo undecennale delle macchie solari scoperto indipendentemente da Rudolf Wolf e Einrich Schwabe nella seconda metà dell'800. Risulta quindi chiaro come una misura, se pur indiretta, dell'intensità del campo magnetico della Stella si inserisca perfettamente in un contesto generale di studio scientifico del Sole. Purtroppo questo richiede molto tempo e misure molto accurate che

non è stato possibile effettuare visto il numero limitato di visite operative presso l'IRSOL, quindi la mia attività si è fermata alla più semplice interpretazione dei segnali di polarizzazione attraverso i Parametri di Stokes.

Il presente lavoro, presentato per l'Esame di Stato 2016, vuole essere da una parte una sintesi di quelle che sono le tecniche ed i concetti di base impiegati nell'indagine descritta e dall'altra, per quanto mi riguarda molto più importante, del mio coinvolgimento diretto nelle fasi operative necessarie al suo compimento.

L'argomento trattato, come detto, esula dai normali programmi di studio per cui anche il formalismo matematico, che potrebbe essere stato molto più approfondito, è stato volutamente ridotto al minimo indispensabile in quanto avrebbe richiesto conoscenza e comprensione di metodi al di là delle mie possibilità. Ho cercato il più possibile di semplificare, ma senza banalizzare, il mio lavoro ed i suoi risultati, nello spirito di uno studio di carattere più operativo e pratico che teorico, che non sarei stata in grado di gestire in alcun modo. Spero comunque di avere svolto un lavoro apprezzabile pur nella sua limitatezza imposta dalla sua intrinseca complessità.

Polarizzazione della luce

La luce, in base alla teoria ondulatoria, si propaga sotto forma di onde, le quali si sviluppano su diversi piani lungo la direzione di propagazione. Questa perturbazione ottica, che dal punto di vista fisico è definita come una sovrapposizione di onde elettromagnetiche monocromatiche piane, è una funzione del tempo che oscilla rapidamente, e in alcuni casi, la sua forma può essere assimilata a quella di una curva sinusoidale. È inoltre caratterizzata da ampiezza, lunghezza d'onda, frequenza, fase e polarizzazione.

Quest'ultima caratteristica può essere studiata tramite un polarimetro, formato da una sorgente (come una lampada ad incandescenza), una lamina polarizzatrice (lamina di plastica trasparente, usata ad esempio nella fabbricazione degli occhiali da sole, in particolare Polaroid) ed una analizzatrice. Per spiegare questo esperimento è necessario considerare il vettore (*vettore ottico*) di un'onda piana luminosa che si propaga in un mezzo isotropo perpendicolare al piano di propagazione dell'onda.

La sorgente, ordinaria (nella quale la luce vibra in tutti i piani) e monocromatica (di una sola lunghezza d'onda), emette un fascio di luce. Ponendo un polarizzatore lungo il percorso del fascio, la luce attraversa l'ostacolo ed esce dal filtro polarizzata (ossia vibra in un unico piano detto di polarizzazione, determinato dal cosiddetto asse di trasmissione del polarizzatore), senza che avvengano modifiche alla sua intensità. (Polarizzatore ideale)

Invece, introducendo una seconda lamina polarizzatrice (*analizzatore*) tra la sorgente e l'occhio, dopo il polarizzatore, l'effetto sarà diverso. Facendola ruotare infatti, tenendo fissa quella usata precedentemente, l'intensità luminosa varia periodicamente. Quando i filtri sono disposti in modo che i loro assi di trasmissione dei piani siano perpendicolari, l'intensità sarà pari a zero, ossia la luce verrà totalmente estinta e sarà invece di intensità massima quando

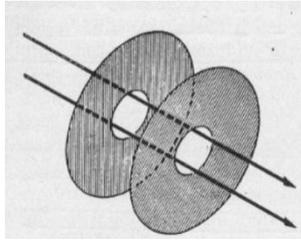


Figura 1 - Lamine polarizzatrici

gli assi di trasmissione siano paralleli, il che si ottiene ruotando di 90° l'analizzatore.

La formula per calcolare l'intensità I della luce emergente dalla seconda lamina polarizzatrice è la seguente, detta *Legge di Malus*:

$$I(\varphi) = I_0 * \cos^2 \varphi$$

Dove I_0 è l'intensità massima emergente dal polarizzatore, φ l'angolo di rotazione della seconda lamina, misurato dalla posizione in cui I è massima).

È appunto il fatto che l'intensità dipenda dalla rotazione angolare della seconda lamina a dimostrare che la perturbazione ottica sia una grandezza vettoriale, la cui direzione non coincide con la direzione di propagazione dell'onda. Inoltre è possibile confermare che la luce sia un'onda trasversale: il vettore ottico cambia rapidamente la sua direzione, ma è sempre perpendicolare alla direzione di propagazione del fascio luminoso. Le onde longitudinali (come il suono) non sono invece polarizzabili.

Nel caso in cui due onde luminose sinusoidali linearmente polarizzate abbiano una stessa frequenza e i loro vettori ottici siano paralleli, esse si sovrappongono in un'unica onda linearmente polarizzata.

Se si considera un'onda luminosa incidente su una lamina polarizzatrice, quest'ultima trasmette la luce senza assorbimento apprezzabile nel caso in cui il vettore ottico sia parallelo all'asse,

mentre è totalmente (o quasi) assorbita nel caso in cui sia ad essa perpendicolare.

Nel caso in cui invece, il vettore ottico non sia né parallelo né ortogonale, può essere considerato come il risultante di due vettori. La lamina trasmette la componente parallela e assorbe quella perpendicolare, in modo che il vettore risulti parallelo all'asse di trasmissione (*onda linearmente o rettilineamente polarizzata*).

La polarizzazione inoltre può essere circolare od ellittica. Si possono ottenere questi due stati in diversi modi, ma anche semplicemente combinando vettorialmente segnali luminosi già polarizzati: ad esempio esistono dei casi particolari per ottenere polarizzazione ellittica o lineare a partire da onde polarizzate circolarmente. I termini ellittica e circolare si riferiscono alla traiettoria descritta dall'estremità del vettore ottico polarizzato risultante:

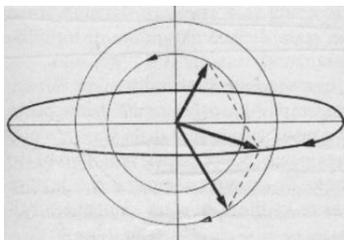


Figura 2 - Polarizzazione ellittica

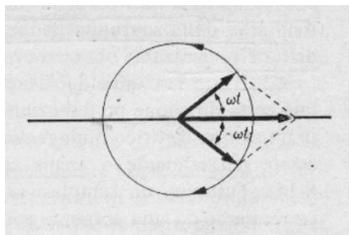


Figura 3 - Polarizzazione lineare

La luce però varia parecchio in base alle condizioni fisiche di una sorgente e tende a cambiare le sue proprietà per svariate cause, come ad esempio quando è immersa in un campo magnetico.

Parametri di Stokes

Per descrivere la polarizzazione di un fascio di luce si può far riferimento a dei parametri misurabili, i cosiddetti *parametri di Stokes*. Essi sono un insieme di quattro valori (che possono essere pensati come le componenti di un quadrivettore, associabile ad ogni punto dello spazio in cui si muove la luce, detto vettore di Stokes) che descrivono tutti gli stati della luce polarizzata, non polarizzata e parzialmente polarizzata. Tramite questi parametri è possibile risalire al valore di un campo magnetico, in cui procede l'onda luminosa.

I parametri sono i seguenti:

- I = intensità totale del fascio di luce
- Q = differenza tra l'intensità misurata dopo un polarizzatore lineare ideale orientato in una direzione scelta arbitrariamente meno quella misurata ruotando il polarizzatore di un angolo di 90° .
- U = differenza tra l'intensità misurata dopo un polarizzatore lineare ruotato di 45° rispetto alla direzione di riferimento e quella misurata ruotando il polarizzatore a -45° .
- V = differenza tra l'intensità misurata dopo un polarizzatore circolare destrorso ideale e quella misurata dopo un polarizzatore circolare sinistrorso ideale.

Se la luce è completamente polarizzata vale la relazione:

$$Q^2 + U^2 + V^2 = I^2$$

Se invece, la luce è parzialmente polarizzata, si avrà:

$$Q^2 + U^2 + V^2 < I^2$$

Nel caso in cui la luce non sia polarizzata, è evidente che:

$$Q^2 + U^2 + V^2 = 0$$

Spesso i tre parametri Q , U e V sono espressi in forma frazionaria:

$$Q/I - U/I - V/I$$

I parametri sono espressi in forma frazionaria relativamente alla intensità totale. Questo per evidenziare più facilmente quale delle caratteristiche di polarizzazione sia eventualmente presente o assente, anche solo parzialmente.

In questo lavoro, convenzionalmente verrà definita la quantità

$$G = \frac{Q^2 + U^2 + V^2}{I^2}$$

che chiameremo *grado di polarizzazione*, il quale vale 1 per la luce totalmente polarizzata e risulta minore di 1 per la luce parzialmente polarizzata. Esistono altre definizioni del grado di polarizzazione, ma sono state ritenute inutilmente complesse per gli scopi di questo lavoro e quindi è stata adottata la definizione qui descritta.

Effetto Zeeman

L'effetto Zeeman, scoperto dal premio Nobel per la fisica Peter Zeeman nel 1896, è un fenomeno che interessa anche il campo magnetico del Sole; esso si manifesta nella suddivisione in numero variabile delle righe spettrali in più componenti (multipletti), ogni volta che una sorgente luminosa si trovi in presenza di un forte campo magnetico (dell'ordine dei kG). La suddivisione si verifica in quanto negli atomi esistono diverse configurazioni elettroniche possedenti una stessa energia; quindi, corrispondono ad una stessa riga spettrale. Attraverso l'interazione di un forte campo magnetico però, le energie dei singoli elettroni variano.

Di conseguenza, avviene uno *splitting* della riga spettrale in sottolivelli energetici; la distanza fra le componenti aumenta al crescere dell'intensità del campo. Da questo effetto si può risalire alla misura del campo magnetico del Sole; in effetti, in assenza della polarimetria si potrebbe ottenere solo una scarsa approssimazione dell'intensità del campo magnetico. Unendo l'effetto Zeeman con la tecnica della polarimetria invece, non solo si può rilevare una misura precisa, ma si può addirittura conoscere la direzione del campo magnetico, grazie ai quattro parametri di Stokes.

L'effetto può essere diviso in due tipologie.

- Effetto Zeeman longitudinale:
 - Il raggio luminoso in considerazione è parallelo al campo magnetico esterno
 - Separazione in due righe spettrali, chiamate σ^+ e σ^- , a frequenza pari a $V_0 + V_L$ e $V_0 - V_L$

Dove V_0 è la frequenza della linea in assenza del campo magnetico, e V_L è la frequenza di Larmor; quest'ultima è la frequenza del moto di precessione del momento magnetico di un dipolo magnetico elementare indotta dalla presenza di un campo magnetico esterno. La

frequenza di Larmor è proporzionale al campo applicato, quindi maggiore è il campo magnetico in cui si trova il dipolo, maggiore è la frequenza del moto di precessione. Ricordiamo qui che per dipolo magnetico si intende una spira ideale percorsa da corrente e che il suo momento magnetico è un vettore perpendicolare al piano della spira, la cui intensità dipende dall'intensità della corrente e la direzione si ottiene con la "regola del pollice e delle dita" o "regola della mano destra"

- Le due componenti sono polarizzate circolarmente, una destrorsa e l'altra sinistrorsa

- Effetto Zeeman trasversale:
 - Il raggio considerato è perpendicolare al campo magnetico esterno
 - Separazione in tre righe spettrali, chiamate σ^+ , π e σ^- , a frequenza: $V_0 + V_L$, V_0 , $V_0 - V_L$
 - Le componenti sono polarizzate linearmente in direzione perpendicolare al campo magnetico in σ^+ e σ^- e in direzione parallela al campo per π

L'effetto Zeeman però, perde la sua efficacia in presenza di campi magnetici turbolenti, che disturbano fortemente lo splitting spettrale, in quanto la frequenza di Larmor, che di fatto misura lo splitting, risente del campo esterno; in questi casi è preferibile risalire al campo magnetico solare tramite un altro effetto, chiamato effetto Hanle. (Hanle W.: 1924, Z. Phys. **30**, 93)

L'effetto Hanle, nonostante la sua importanza, è stato per molto tempo trascurato rispetto all'effetto Zeeman; solo in tempi più recenti sono state capite appieno quali siano le sue potenzialità, soprattutto per spiegare alcuni effetti quantistici altrimenti di difficile interpretazione.

Effetto Hanle

La luce che proviene dal centro del disco solare, lontano da regioni attive, non è polarizzata per ragioni di simmetria. Tutti i contributi dei vari vettori ottici si annullano reciprocamente data l'isotropia della propagazione delle onde luminose. Diverso è il discorso per esempio dentro una macchia solare, dove campi magnetici dell'ordine dei kG generano segnali polarizzati osservabili per esempio con l'effetto Zeeman. In generale però, per avere luce polarizzata ci vuole una causa che spezzi l'isotropia. Nel caso dell'effetto Zeeman questa causa è il campo magnetico che provoca lo splitting delle righe spettrali rimuovendo la degenerazione dei livelli e producendo sottolivelli aggiuntivi che, come si è visto, danno vita a transizioni osservabili come righe polarizzate circolarmente in versi opposti (effetto longitudinale), o polarizzate linearmente in direzioni parallele e perpendicolari alla direzione del campo (effetto trasversale).

Luce polarizzata si può avere anche grazie alla polarizzazione per diffusione (detta anche di risonanza). Il campo elettromagnetico dell'onda incidente accelera una particella carica del plasma, inducendo l'emissione di radiazione della stessa frequenza dell'onda incidente: in questo modo l'onda incidente viene diffusa. Nel caso di una particella non relativistica, cioè con velocità trascurabile rispetto a quella della luce, la principale causa dell'accelerazione della particella è dovuta al campo elettrico dell'onda incidente. La particella si muove nella direzione del campo elettrico oscillante, generando a sua volta radiazione elettromagnetica, irradiandola in modo più intenso nelle direzioni perpendicolari a quella del suo moto. Questa radiazione è polarizzata linearmente al 100% solo lungo la direzione del moto della particella. Pertanto, in base alla posizione dell'osservatore, la radiazione prodotta in una certa zona dello spazio tridimensionale può sembrare percentualmente più o meno polarizzata e presentare quindi un grado di polarizzazione variabile. È

interessante notare come non sia affatto necessaria la presenza di un campo magnetico nel processo descritto.

Questo è molto facilmente osservabile al bordo del Sole, dove l'anisotropia nel fenomeno è dovuta al fatto che la radiazione proveniente dagli strati inferiori dell'atmosfera è molto più intensa di quella proveniente dagli strati più esterni. L'effetto Hanle consiste nella depolarizzazione dei segnali di polarizzazione per diffusione in prossimità del lembo solare. Una trattazione completa di questo effetto richiede un pesante uso della meccanica quantistica e quindi non è possibile riportarla in questa sede.

Esiste comunque un modello classico, in cui gli atomi sono trattati come sistemi di dipoli elettrici diretti lungo gli assi di una terna cartesiana ortogonale, in cui il vettore z è convenzionalmente diretto verso l'alto e coincide con la direzione di propagazione di un'onda elettromagnetica non polarizzata, che viene parzialmente polarizzata con le oscillazioni dei dipoli lungo gli altri due assi. Il campo magnetico depolarizzante è in direzione dell'asse y . Questo modello, proposto ad esempio da Stenflo (2010) (1) è stato ripreso anche da altri autori, tra i quali Bianda e Ramelli (2014) (2).

Seguendo un termine introdotto per la prima volta da V.V. Ivanov nel 1991 la struttura spettrale di queste misure di polarizzazione lineare è stata chiamata "*Secondo spettro solare*" ed offre una grande ricchezza di informazioni grazie alla sua differenza e complementarità rispetto allo spettro ottico tradizionale. Vediamo ora alcuni esempi di misure effettuate all'IRSOL con ZIMPOL III, come introduzione a quelle che ho poi potuto eseguire personalmente, anche se su un diverso intervallo spettrale (doppietto D1-D2 del Na). Nella figura 4 è riportata una misura del vettore di Stokes in una regione spettrale attorno alla riga del calcio neutro a 422.7 nm registrata in prossimità del bordo nord del Sole:

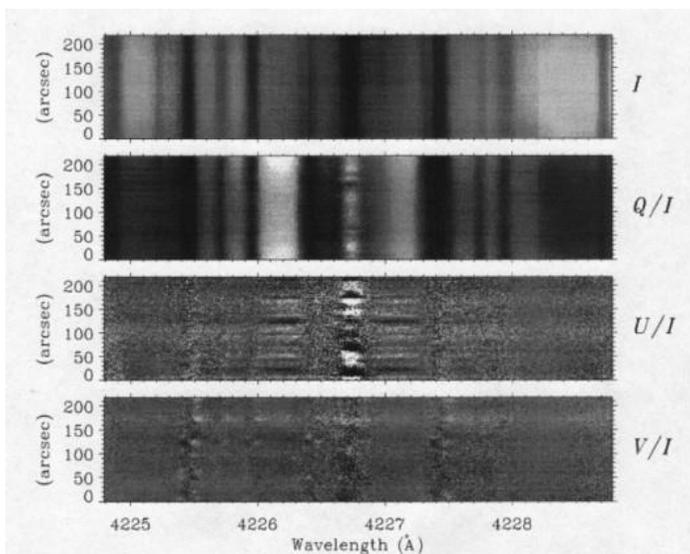


Figura 4 – Imm. del vettore di Stokes in prossimità della riga del calcio a 422.7 nm

In assenza di campo magnetico si osserverebbe un segnale uniforme di polarizzazione lungo tutta la fenditura, presente in Q/I ma assente in U/I per motivi di simmetria. Qui però siamo in presenza di un campo magnetico debole ma turbolento che depolarizza il segnale di polarizzazione lineare in Q/I e introduce una rotazione del piano di polarizzazione osservabile in U/I al centro dell'immagine.

In figura 5 è invece riportata una misura di una regione di spettro attorno a 514.0 nm effettuata vicino al bordo solare con la fenditura dello spettrografo orientata parallelamente al bordo:

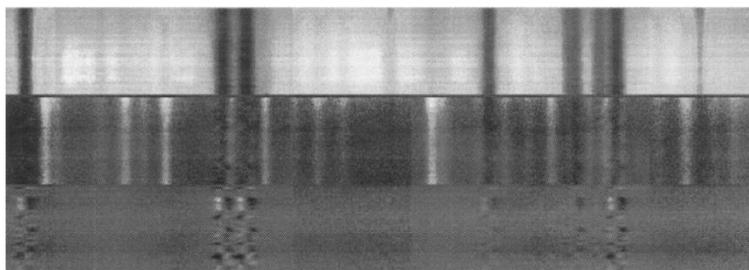


Figura 5 – Imm. del vettore di Stokes in una regione di spettro attorno a 514.0 nm

Nell'immagine di I si vede un intervallo spettrale da 513.7 nm a 514.4 nm con contributi di righe del ferro neutro (le più scure) e righe molecolari C₂. Poiché la misura è stata fatta molto vicino al lembo, ci sono le condizioni di anisotropia descritte in precedenza che danno origine al Secondo spettro solare. Questo risulta evidente nella figura 6 che riporta i profili dell'immagine di intensità e dell'immagine di polarizzazione in Q/I elaborate a partire dalla misura e mediate su un intervallo spaziale di 120" d'arco attorno alla zona centrale (in pratica "l'altezza" dell'immagine).

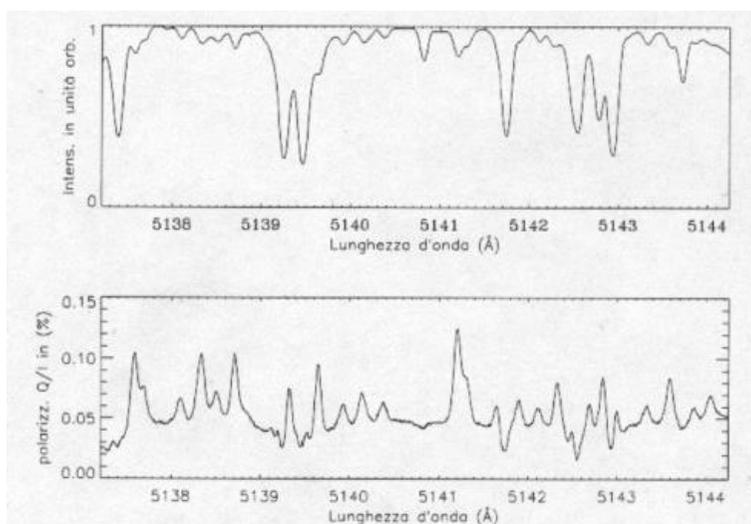


Figura 6 – Profili di intensità di Q/I relativi alla misura di cui alla figura 5

In assenza di campo magnetico i tre picchi a 514.00 nm, 514.02 nm e 514.04 nm dovrebbero presentare lo stesso valore, ma come si vede questo non è vero: i segnali aggiuntivi prodotti dalla depolarizzazione Hanle sono il Secondo spettro solare.

L'effetto Hanle non fu inizialmente accolto con grande entusiasmo dalla comunità scientifica, ma con il passare del tempo ci si accorse che gioca un ruolo fondamentale nella comprensione di molti fenomeni quantomeccanici. Inoltre la sua sensibilità a campi turbolenti, che costituisce un serio limite per l'effetto Zeeman, è

invece sicuramente uno dei suoi punti di forza, specialmente nell'osservazione dello spettro solare nell'ultravioletto.

In conclusione, se nell'effetto Zeeman un campo magnetico funge da agente polarizzante, nell'effetto Hanle si comporta normalmente da causa depolarizzante della radiazione diffusa al bordo. Solo normalmente, perché a volte l'effetto Hanle produce dei segnali positivi in Q/I, quindi può essere polarizzante. Questo è tuttora oggetto di studio, così come esiste un effetto Hanle osservabile anche al centro disco dove, di norma, qualunque segnale di polarizzazione dovrebbe essere assente. È di solito piuttosto difficile, nelle immagini spettropolarimetriche del vettore di Stokes, separare nettamente, almeno in Q/I e U/I, quello che può essere il contributo Zeeman da quello Hanle. Diverso è il contributo in V/I, dove, se presente, la traccia dell'effetto Zeeman è inconfondibile, mentre non possono esserci contributi Hanle vista la polarizzazione esclusivamente circolare.

L'interpretazione dei segnali relativi al vettore di Stokes è quindi, in prima battuta, molto difficile e riservata ad un "addetto ai lavori" esperto. Più semplice è forse la loro lettura in termini di profili di intensità, che è quello che verrà presentato nella sezione successiva, relativa all'analisi delle mie misure effettuate a Locarno con ZIMPOL.

Studio spettropolarimetrico del campo magnetico solare

Il telescopio e il polarimetro ZIMPOL dell'IRSOL

Il 27 aprile e l'11 maggio scorsi mi sono recata con Mario Gatti, direttore dell'osservatorio solare dell'ISIS Valceresio presso l'IRSOL, Istituto Ricerche Solari di Locarno, fondato nel 1960 con sede a Locarno Monti (CH). Il centro si occupa di osservazioni dello spettro solare e delle condizioni fisiche nell'atmosfera del Sole, concentrandosi sul suo magnetismo presente nella fotosfera (strato più interno dell'atmosfera solare) e nella cromosfera (strato al di sopra della fotosfera). Attualmente collabora con molte strutture di ricerca in tutto il mondo, tra cui il Politecnico Federale di Zurigo, e l'Università della Svizzera italiana (USI) di Lugano.

Il centro è rinomato a livello mondiale per la strumentazione avanzata nel campo della fisica solare, tra le quali ne spiccano due in particolare, un telescopio solare e un polarimetro.

Il primo è un Gregory-Coudé, caratterizzato dal diametro dello specchio primario di 45 cm e addirittura una lunghezza focale totale equivalente di 25 m; ciò permette di disporre di un telescopio studiato appositamente per misure di spettropolarimetria. Infatti, con questo strumento, è possibile risalire indirettamente alla proprietà del *magnetic field* del Sole, effettuando delle misure spettrometriche (con uno spettrometro Czerny-Turner, lunghezza focale 10 m, reticolo 180 mm x 360 mm, 300 linee / mm e angolo di incisione 63°) e di polarimetria, attraverso lo ZIMPOL.

Quest'ultimo, il cui nome per intero è ZIMPOL-3 (Zurich IMaging POLarimeter), è stato originariamente sviluppato al Politecnico Federale di Zurigo. Quest'ultimo strumento, praticamente unico al mondo (ne esiste un secondo modello operante presso l'Osservatorio Solare di Tenerife nelle Isole Canarie, mentre è in progetto la realizzazione di un terzo ZIMPOL installato presso l'Osservatorio Solare dell'Isola di Maui nelle Hawaii), consiste in un polarimetro in grado di svolgere delle misure spettro polarimetriche di alta qualità.

La versione più recente dello strumento è basata su un design compatto e flessibile, e su una tecnologia moderna, che facilmente si adatta a nuove applicazioni, con sensori più efficienti.

Lo ZIMPOL di Locarno Monti permette di misurare segnali di polarizzazione (o depolarizzazione) anche piccolissimi, dell'ordine dello 0.0001% (10^{-5}) in intensità. La sua accuratezza ha permesso negli ultimi 15 anni di aprire nuovi orizzonti circa i fenomeni che hanno luogo nell'atmosfera solare, specialmente quelli che si possono osservare vicino al bordo del Sole, e la loro dipendenza spettrale.

Di seguito è riportata una struttura schematica della strumentazione dell'IRSOL, dal telescopio, allo spettrografo e al polarimetro ZIMPOL. Dall'immagine è quasi impossibile rendersi conto della reale portata di questo eccezionale impianto di osservazione: per capirlo davvero è necessario vederlo e io ho avuto la possibilità e forse la fortuna di poterlo fare:

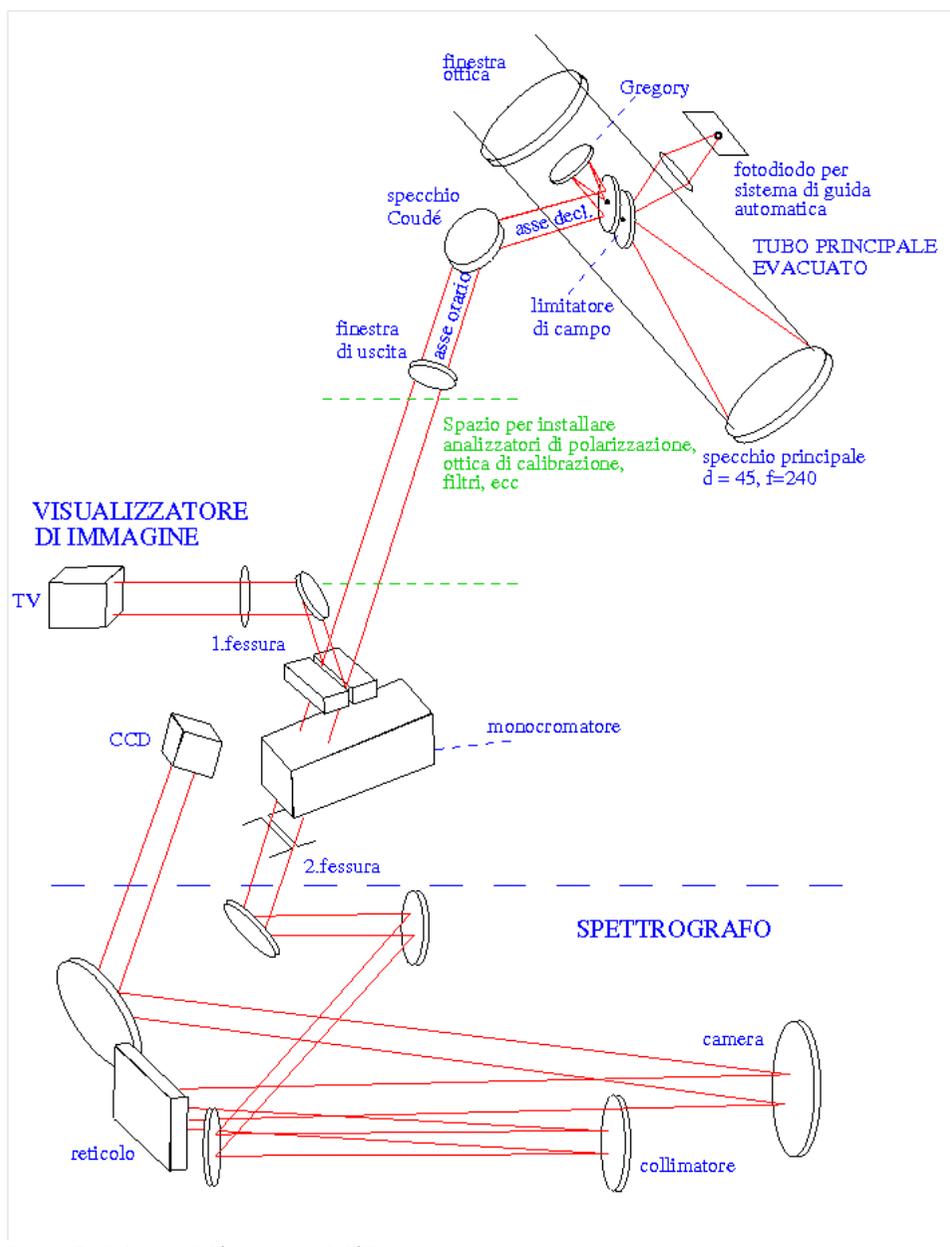


Figura 7 - Schema dell'apparato dell'IRSOL

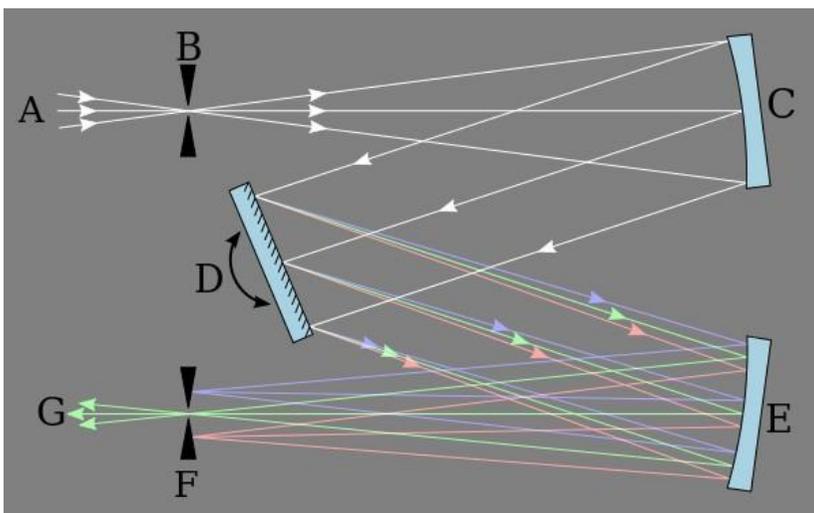


Figura 8- Uno schema di un monocromatore Czerny-Turner. La luce (A) è focalizzata su una fenditura di ingresso (B) e collimata da uno specchio curvo (C). Il raggio collimato è poi diffratto da un reticolo rotante (D) e il fascio disperso è quindi rifocalizzato da un secondo specchio (E) sulla fenditura di uscita (F). Ogni lunghezza d'onda è focalizzata in una differente posizione della fenditura e la lunghezza d'onda trasmessa attraverso l'ultima fenditura (G) dipende dall'angolo di rotazione del reticolo.

Misure spettro polarimetriche eseguite all'IRSOL con ZIMPOL:

Come detto in precedenza, l'intervallo spettrale da me impiegato per la misura dei parametri di Stokes necessari per l'interpretazione dei segnali di polarizzazione dovuti al campo magnetico del Sole in prossimità del bordo, sia per effetto Hanle che per effetto Zeeman, è stato scelto nel cosiddetto "doppietto del Sodio", due righe spettrali molto vicine, ma che lo spettrometro dell'IRSOL non ha nessuna difficoltà a separare nettamente, come si vedrà poi dalle immagini, che hanno origine nella cromosfera solare ad una temperatura di poco superiore a quella fotosferica e nettamente minore di quella coronale.

In spettroscopia si definisce "doppietto" una coppia di righe spettroscopiche molto vicine, nelle quali si divide una riga dello spettro di un elemento. Nel caso del Sodio, sia nello spettro di emissione che in quello di assorbimento (io ho analizzato quest'ultimo) le due righe hanno lunghezze d'onda di 5890 e 5896 Å. Il doppietto del sodio si genera in emissione mediante la transizione dell'elettrone 3s del sodio dallo stato eccitato 3p allo stato di base. Poiché spin elettronico e momento angolare orbitale interagiscono (accoppiamento spin-orbita), lo stato 3p è suddiviso in due stati fini con momento angolare totale $J = 1/2$ e $j = 3/2$. La differenza di energia tra i due stati fini ammonta a 0.0021 eV, le lunghezze d'onda delle transizioni allo stato di base a 588.9950 nm (riga D2) e 589,5924 nm (riga D1).

Il primo passo per ottenere le misure con ZIMPOL III è stato quello di allineare le ottiche del sistema Czerny-Turner nella stanza dello spettrografo, la quale si trova al di sotto del locale contenente ZIMPOL III e tutte le macchine di controllo per le misure.

In seguito, in quella che a Mario Gatti piace chiamare la "sala operatoria" (ovviamente il paziente è il Sole), insieme al Dott. Michele Bianda, direttore dell'IRSOL, abbiamo effettuato una serie di operazioni preparatorie per ZIMPOL, facendo prima di tutto una

misura di polarizzazione al centro del Sole, dove, per le ragioni di simmetria spiegate in precedenza, si ottengono segnali di polarizzazione nulli, o quasi. Questo serve per “fissare lo zero”, come si dice in gergo, cioè definire un sistema di riferimento iniziale dal quale cominciare a rilevare dei segnali non nulli. Dopo le necessarie operazioni per l’ottica adattativa, necessaria per correggere la distorsione dell’immagine dovuta al seeing (già comunque più che buona di suo, nonostante un vento abbastanza teso da Nord che faceva pensare ad un’immagine distorta del bordo disco, ma per fortuna così non è stato) è stata infine utilizzata la tecnica della *dark image* (detta anche di *Black Balancing*) necessaria per impostare la camera CCD in modo da farle distinguere correttamente lo sfondo nero dello spazio da quello grigio del bordo del Sole senza falsare le tonalità di colore e quindi in ultima analisi per migliorare la qualità delle immagini dei segnali che abbiamo poi ottenuto.

Quando tutto era pronto, con Michele abbiamo dato l’avvio a una serie di misure diverse, della durata di quindici minuti – venti minuti l’una. Vista la piccola porzione di Sole interessata e il ristretto intervallo spettrale, tenuto conto inoltre che nel telescopio un fotoriduttore limita all’1% l’intensità della luce raccolta dallo specchio principale, per poter ottenere dei segnali molto ridotti (fino al fattore 10^{-5} di cui si è detto), è necessario “catturare” un congruo numero di fotoni, il che richiede tempi di misura dell’ordine delle decine di minuti. I risultati ottenuti con l’ultima misura sono stati veramente sorprendenti e sono quelli che andiamo a discutere ed analizzare nel seguito, con l’aiuto delle immagini ottenute direttamente con ZIMPOL (vettore di Stokes) e con un software di rielaborazione delle stesse, sviluppato all’IRSOL su piattaforma Linux, che permette di ottenere i cosiddetti profili di intensità, molto più chiaramente interpretabili rispetto alle misure dirette.

Dati ricavabili dalle misure

Dalle immagini ricavate dalle misure è stato possibile studiare come gli effetti Zeeman e Hanle influenzino il campo magnetico solare.

In Q/I è evidente l'effetto Hanle quando avviene un abbassamento della linea del profilo verso la parte negativa; in U/I è presente contemporaneamente il contributo dei due effetti legati alla rotazione del piano di polarizzazione, mentre infine in V/I è chiaramente presente l'effetto Zeeman longitudinale, con separazione tra due tipi di polarizzazione destrorsa e sinistrorsa.

Nelle prossime pagine sono riportati, con una breve descrizione, il vettore di Stokes relativo al doppietto del Sodio ottenuto con una misura di circa 20 minuti in condizioni di seeing non certo ottimali ma comunque di buona qualità. Visto che la "lettura" diretta dei segnali di polarizzazione non è semplice, sono stati ricavati alcuni profili di intensità dei parametri di Stokes, calcolati su posizioni diverse della fenditura e mediati su due diversi intervalli abbastanza ristretti (qualche decina di secondi d'arco), riportati con linee di colore diverso, in modo da evidenziare la variazione dei segnali, che appare netta, a conferma dell'estrema variabilità e turbolenza del campo magnetico in prossimità del bordo solare. Questo, in ultima analisi, spinge all'utilizzo dei dati di depolarizzazione Hanle piuttosto che il contributo di polarizzazione dell'effetto Zeeman per la determinazione indiretta dell'intensità del campo magnetico.

Seguono, in dettaglio, gli intervalli considerati per mediare i segnali grezzi in modo da ottenere i profili di intensità:

- In prossimità del Polo N eliografico (Fig.11) da 105" a 115" (profili neri) e da 120" a 130" (profili rossi)
- In prossimità del lembo W (Fig.12) da 102" a 108" (profili neri) e da 64" a 70" (profili rossi)



Figura 9 - Immagine della fenditura dello spettrografo posta a 7" d'arco dal bordo W della cromosfera, a 5° eliografici a Sud dell'equatore.

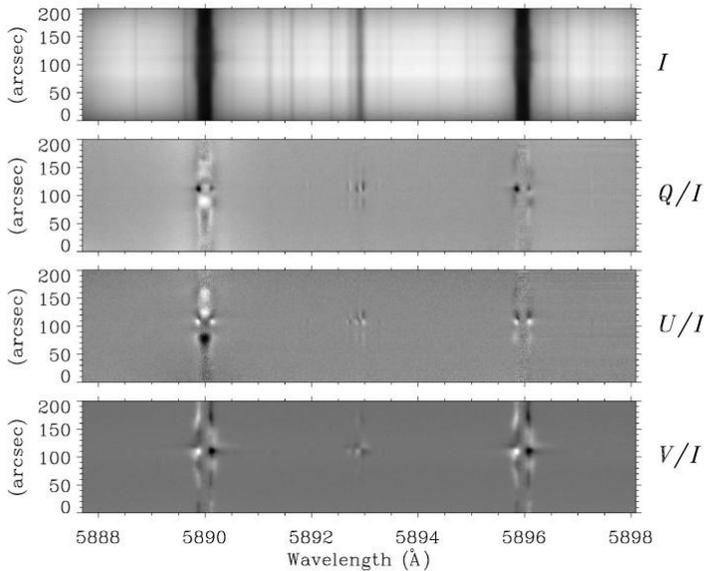


Figura 10 - Immagine del vettore di Stokes diretta ottenuta con Zimpol, con evidente difficoltà a saper distinguere i contributi dei vari effetti di polarizzazione-depolarizzazione se non che per un osservatore esperto

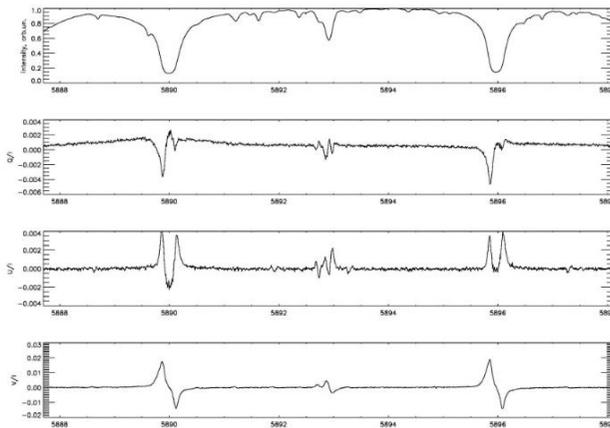


Figura 11 - Profili di intensità dei parametri di Stokes su tutta l'altezza della fenditura (200" d'arco)

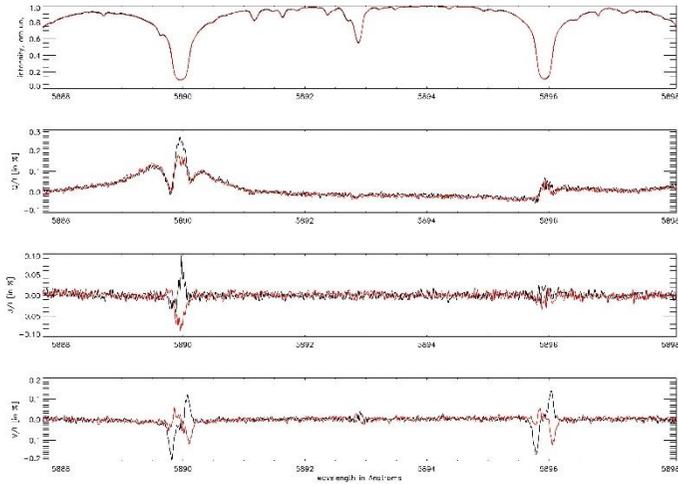


Figura 12 - Profili di intensità dei parametri di Stokes misurati al polo Nord eliografico mediati in due intervalli ristretti della fenditura (linee rossa e nera) che evidenziano la scarsa attività magnetica in prossimità del polo (come è giusto che sia visto l'avvicinamento del Sole ad un minimo del ciclo)

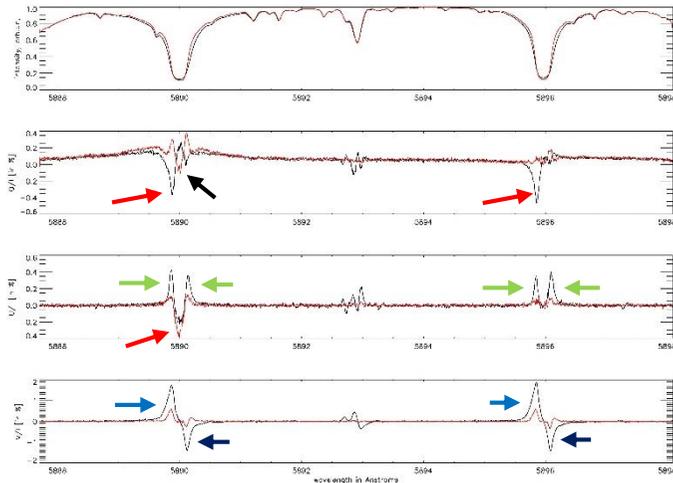


Figura 13 - Profili di intensità dei parametri di Stokes misurati in prossimità del lembo W a circa 5° S dell'equatore mediati in due intervalli ristretti della fenditura (linee rossa e nera, come nella figura precedente). Freccie di diverso colore, spiegati nel seguito, indicano i contributi ai segnali di polarizzazione dovuti all'effetto Zeeman (longitudinale o trasversale), piuttosto che all'effetto Hanle, là dove è possibile distinguerli con una certa sicurezza.)



Depolarizzazione Hanle



Probabile contributo Zeeman trasversale alla polarizzazione lineare in Q/I



Possibili contributi Hanle alla rotazione del piano di polarizzazione, sovrapposte a un possibile segnale Zeeman trasversale.



Netti segnali di polarizzazione circolare **destrorsi** e **sinistrorsi** per effetto Zeeman longitudinale. La scelta del verso positivo della rotazione del vettore ottico è assolutamente arbitraria.

Sviluppi delle misure spettropolarimetriche all'IRSOL

Come si è visto, il Secondo spettro solare permette di ottenere una grande quantità di informazioni sul Sole e sul magnetismo solare. Un lavoro molto significativo compiuto all'IRSOL è un atlante completo di questi segnali di polarizzazione misurati in prossimità del bordo del Sole in funzione della lunghezza d'onda (Gandorfer, 2000, 2003 (3-4)). Vista l'importanza dell'utilizzo dell'effetto Hanle in spettro polarimetria è stato deciso, a partire dal 2007, di avviare un programma sinottico di monitoraggio del Secondo spettro solare basato sull'osservazione delle righe molecolari del C_2 a 514.0 nm, mostrato in figura 14:

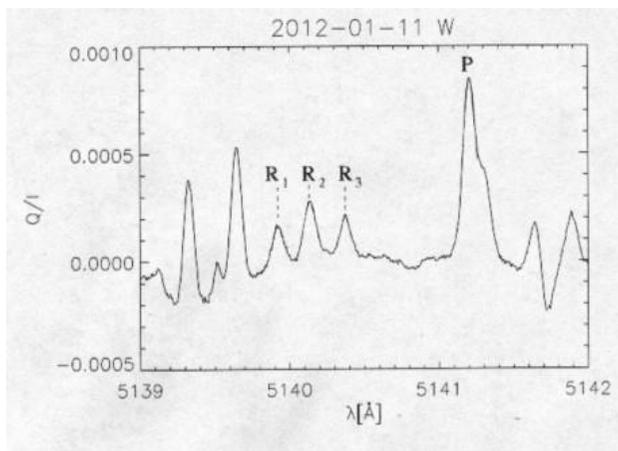


Figura 5 - Il Secondo Spettro Solare per la riga del C_2 intorno a 514.0 nm.

Il lavoro interessa l'effetto Hanle differenziale tra le righe osservate, cioè la misura delle ampiezze del rapporto dei segnali ottenuti nelle righe identificate con R_1 , R_2 , R_3 e P , ipotizzando che tale rapporto dipenda dal campo magnetico (Kleint et al., 2011 (5)). I primi risultati ottenuti in un periodo di minima attività solare verranno poi confrontati con quelli dell'intero ciclo in corso, per evidenziare eventuali cambiamenti legati alla variazione di attività.

Un'altra interessantissima applicazione dell'effetto Hanle riguarda la natura dei modelli della dinamo solare, cioè del tentativo di spiegare i cicli di attività ricorrendo alla rotazione differenziale della stella i cui strati superficiali ruotano con periodi diversi, più velocemente all'equatore e più lentamente ai poli. Il modello di dinamo più conosciuto è detto modello della dinamo globale o del trasporto di flusso e fu proposto da Babcock nel 1961 (6), quindi successivamente elaborato matematicamente da Leighton (1964, 1969 (7-8)).

Dalla fine degli anni 90 sono state avanzate ipotesi dell'esistenza di un meccanismo di dinamo locale, alimentato dai movimenti presenti a livello della granulazione fotosferica, pertanto indipendente dalle forze generate dalla rotazione differenziale. Alcuni dati ottenuti negli anni successivi, utilizzando i dati della sonda Hinode, hanno portato a una situazione di controversia, legata soprattutto alla capacità degli strumenti di ottenere una risoluzione spaziale (circa 250 Km) sufficiente per la misura dei campi magnetici. Sembrerebbe quindi impossibile effettuare misure che depongano in modo definitivo per l'una o l'altra teoria.

Ma ora, con l'avvento di Zimpol III è disponibile una tecnologia che permette, grazie all'effetto Hanle, di ottenere misure dei campi magnetici ben al di sotto della risoluzione spaziale degli strumenti. Infatti, contrariamente a quanto accade con l'effetto Zeeman, che necessita di un campo magnetico risultante con un'orientazione ben definita nel campo della regione osservata, quindi la presenza di campi turbolenti come quelli del bordo del disco conduce alla distruzione reciproca dei vari contributi alla polarizzazione, dando un segnale risultante nullo, l'effetto Hanle, come detto, è sensibile anche ai campi magnetici turbolenti ed ogni contributo è tale da produrre una diminuzione del grado di polarizzazione da diffusione. Ecco quindi che il programma sinottico del Secondo spettro solare previsto

all'IRSOL si pone come ricerca assolutamente di punta nella comprensione dell'attività solare.



Figura 15 – IRSOL di Locarno-Monti



Figura 16 – IRSOL di Locarno-Monti



Figura 17 – Telescopio



Figura 18 - Telescopio



Figura 19 – Dettaglio di ZIMPOL III

Space Weather

Lo studio del magnetismo solare, più altre tecniche complesse, come ad esempio lo studio dell'interno del Sole (Eliosismologia), oltre che per le motivazioni dette, è di fondamentale importanza per lo "Space Weather", espressione che usualmente non si traduce, in quanto il suo significato letterale (Meteorologia Spaziale), ha un significato solo indicativo. Con l'espressione "Space Weather", che è una vera scienza e di recente introduzione, si intende lo studio delle relazioni causa-effetto che ci possono essere tra la Terra ed il Sole, non più intesi come corpi legati solo gravitazionalmente, ma come facenti parti di un unico sistema fisico, il sistema Sole-Terra.

Questi complessi meccanismi di interconnessione tra l'attività solare e le sue ripercussioni sulla Terra producono sul nostro pianeta quelle che vengono dette, con un termine molto accattivante, "Tempeste Solari". In parole povere, si cerca di spiegare come gli eventi che accadono sul Sole (cause) possono avere delle implicazioni (effetti) sulla Terra. Questi fenomeni possono essere eventi più o meno drammatici, che interessano principalmente la tecnologia e possono essere la causa di rischi biologici per coloro che si trovano al di fuori dalla naturale protezione che la Terra ci offre con il suo campo magnetico (come astronauti, passeggeri ed equipaggi di voli ad alta quota specialmente su rotte polari).

Il nostro Pianeta, come risposta ad eventi che accadono sul Sole (come ad esempio flare, protuberanze, emissioni coronali di massa, vento solare, flussi di elettroni/protoni ecc...) può essere vittima di radio blackout, tempeste geomagnetiche e tempeste di Radiazione. Questi fenomeni sono attualmente ancora impossibili da prevedere con precisione, ma è possibile, con dei modelli matematici, fisici o statistici, dare una stima della probabilità che un certo evento possa accadere entro alcune ore.

È materia complessa, che per essere affrontata in modo approfondito richiede, come detto, l'uso di modelli fisico-matematici

complicati, di cui alcuni considerati già attendibili, altri ancora in fase di sviluppo. Però alla base di tutto c'è un concetto essenzialmente semplice: al contrario di quanto accade sulla Terra, dove magnetismo e materia non si influenzano reciprocamente, sono per così dire disaccoppiati, sul Sole accade l'esatto contrario: il campo magnetico ed il plasma solare non sono due cose che si ignorano.

Questo accoppiamento materia-campo è diverso a seconda della parte della stella che si considera. A partire dalla separazione tra la zona radiativa e quella convettiva al di sotto della fotosfera (*Tacochline*) è la materia a prevalere sul campo: ad esempio i continui i moti convettivi che portano il plasma a risalire dal di sotto della fotosfera fino ad "emergere" e "rientrare" nella stessa, formando così le macchie solari, "trascinano" le linee del campo magnetico, che uscendo e rientrando dalla fotosfera intrappolate nella materia in movimento generano i dipoli magnetici caratteristici di tutte le regioni attive.

Più in alto, tra la cromosfera e la bassa corona, è il campo che comincia a prevalere sulla materia. Questa è chiamata "zona di transizione" ed è una delle più misteriose ed affascinanti del Sole, dove la temperatura comincia a risalire verso l'ordine di grandezza dei milioni di gradi (problema della "corona calda") e dove probabilmente si innescano tutti i meccanismi che portano a quegli eventi citati prima, come i flare, le emissioni coronali di massa, le protuberanze eruttive, che possono poi, se in rotta di collisione con la Terra, disturbare anche severamente il nostro pianeta.

Un effetto ben noto della prevalenza del campo sulla materia in corona sono gli "Archi Coronali" (Coronal loops), colonne immense di plasma "trasportate" dal campo magnetico e per così dire "congelate" nel suo flusso, che costituiscono una vera e propria immagine diretta dell'andamento delle linee di campo, un po' come avviene, si perdoni la banalità del paragone, immergendo un magnetino a forma di sbarra nella limatura di ferro. Con la differenza

che sul Sole la situazione è caotica ed in continuo cambiamento. Lo studio del magnetismo solare è quindi fondamentale per la comprensione di ciò che accade nella zona di transizione e nell'atmosfera della stella.

Quando saranno disponibili degli elementi più concreti relativi a questa indagine, allora forse si riuscirà ad avere dei tempi più lunghi di previsione degli effetti prodotti sulla terra a causa dell'attività solare.

Conclusione

Nonostante sia a conoscenza della difficoltà dell'argomento, ho cercato di semplificarne il contenuto il più possibile, sperando di rendere la sua comprensione il più possibile chiara a tutti.

Gli argomenti di cui ho trattato non sono inclusi nel programma scolastico, ma sono frutto di approfondimenti di fisica solare extra-scolastiche e della mia partecipazione al progetto *Astro.Net*.

Il progetto, nel quale sono coinvolti studenti di terza, quarta e quinta frequentanti il liceo scientifico, è svolto nell'Osservatorio della scuola, uno tra quelli accreditati presso il SIDC (Solar Influences Data Analysis Center) di Bruxelles, che raccoglie e elabora dati provenienti da tutto il mondo. *Astro.Net* prevede nei primi due anni uno studio approfondito del Sole e osservazioni astronomiche, in particolare delle sue macchie solari, e il relativo calcolo del numero di Wolf, delle sue protuberanze visibili e dell'osservazione con un telescopio H- α . L'ultimo anno invece, include la compilazione di un report giornaliero con i dati relativi allo Space Weather e nozioni di base di fisica solare. Inoltre, dallo scorso anno scolastico siamo stati coinvolti in un nuovo progetto di importanza scientifica a livello mondiale: il riconteggio dei Numeri di Wolf ottenuti dalla Specola Solare Ticinese a partire dal 1981, utilizzando un metodo diverso, definito non-ponderato. Questo lavoro è inquadrato in un contesto di importanza mondiale enorme, in quanto fondamentale per la conoscenza dell'andamento del ciclo solare.

Per concludere, tutto il lavoro che ho svolto, che spero si possa considerare una vera e propria ricerca, ha avuto un solo obiettivo: valutare quali siano le attività che ogni giorno accadono sul Sole e soprattutto, studiare quali siano i loro effetti sul nostro Pianeta.

Ringraziamenti

Desidero dedicare la sezione finale del lavoro a tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura di questa tesina.

Ringrazio prima di tutti Mario Gatti, il direttore del nostro Osservatorio, il quale non solo mi ha accompagnato negli ultimi tre anni liceali nella mia partecipazione al progetto *Astro.Net*, ma soprattutto per essersi “gettato a capofitto”, e senza esitazione, nell’attività che ho presentato.

Mi sono appassionata a questi argomenti grazie al lavoro che svolge, e ho così avuto questa unica opportunità di elaborare una vera e propria ricerca scientifica.

Inoltre, Mario non si è mai arreso davanti alla mia scarsa destrezza nella fisica e in particolare nell’astrofisica, ma anzi ha saputo, armato di pazienza, coinvolgermi in un lavoro di così grande portata: verso di lui sono rivolte tutta la mia gratitudine e i miei più sinceri ringraziamenti.

Un ringraziamento particolare va al direttore dell’IRSOL Dott. Michele Bianda, e al Dott. Luca Belluzzi, ricercatore dell’IRSOL, i quali mi hanno permesso di partecipare alle sessioni di misura con ZIMPOL e nelle successive attività di interpretazione dei risultati. Grazie per avermi concesso una tale opportunità, un’esperienza unica.

Riferimenti bibliografici

- 1) Stenflo, Jan O., "Stokes polarimetry of the Zeeman and Hanle effects", *A&A Review* 2010
- 2) Bianda M, Ramelli R. "Evoluzione e variabilità del campo magnetico cromosferico e fotosferico solare). Pubblicazione Interna IRSOL 2014
- 3) Gandorfer, A. "The Second Solar Spectrum: A high spectral resolution polarimetric survey of scattering polarization at the solar limb in grafical representation". Vol I (*VdF, Hochschulverlag an der ETH Zurich*)
- 4) Gandorfer A. *op.cit.* Vol II-III
- 5) Kleint, L., Shapiro, A.I., Berdyugina, S.V., & Bianda, M. 2011b, **A&A**, 536, A47
- 6) Babcock, H.W.: 1961, *Astrophys. J.* **133**,572
- 7) Leighton, R.B.: 1964, *Astrophys. J.* **140**,1547
- 8) Leighton, R.B.: 1969, *Astrophys. J.* **156**,1

Di seguito è riportato un elenco di libri e siti online che ho consultato durante la stesura della tesina. Consiglio vivamente a coloro che siano interessati all'argomento di prenderne visione.

Bibliografia

- Michele Bianda, Renzo Ramelli, Evoluzione e variabilità del campo magnetico cromosferico e fotosferico solare. IRSOL 2014
- Bruno Rossi, Ottica. Masson Italia Editori S.p.A Milano 1977
- Egidio Landi Degl'Innocenti, Fisica Solare. Springer-Verlag Italia, Milano 2008

Sitografia

IRSOL di Locarno-Monti:

- <http://www.irsol.ch>

U.S., National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA):

- <http://www.noaa.gov/>

Solar physics research department of the Royal Observatory of Belgium, Solar Influences Data Analysis Center (SIDC):

- <http://sidc.be/cactus/>

U.S., National Aeronautics and Space Administration (NASA):

- <https://www.nasa.gov/>

Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment (LASCO):

- <http://lasco-www.nrl.navy.mil/>

Solar Dynamics Observatory (SDO):

- <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>

Fonti delle immagini

FIGURA 1 – BRUNO ROSSI, TESTO CITATO

FIGURA 2 – BRUNO ROSSI, TESTO CITATO

FIGURA 3 – BRUNO ROSSI, TESTO CITATO

FIGURA 4 – MICHELE BIANDA, RENZO RAMELLI, EVOLUZIONE E VARIABILITÀ DEL CAMPO MAGNETICO CROMOSFERICO E FOTOSFERICO SOLARE. IRSOL 2014

FIGURA 5 – MICHELE BIANDA, RENZO RAMELLI, EVOLUZIONE E VARIABILITÀ DEL CAMPO MAGNETICO CROMOSFERICO E FOTOSFERICO SOLARE. IRSOL 2014

FIGURA 6 – MICHELE BIANDA, RENZO RAMELLI, EVOLUZIONE E VARIABILITÀ DEL CAMPO MAGNETICO CROMOSFERICO E FOTOSFERICO SOLARE. IRSOL 2014

FIGURA 7 - WWW.IRSOL.CH

FIGURA 8- EN.WIKIPEDIA.ORG

FIGURA 9 – MISURE SPETTROPOLARIMETRICHE CON ZIMPOL. LOCARNO, IRSOL, APRILE-MAGGIO 2016

FIGURA 10 - MISURE SPETTROPOLARIMETRICHE CON ZIMPOL. LOCARNO, IRSOL, APRILE-MAGGIO 2016

FIGURA 11 - MISURE SPETTROPOLARIMETRICHE CON ZIMPOL. LOCARNO, IRSOL, APRILE-MAGGIO 2016

FIGURA 12 - MISURE SPETTROPOLARIMETRICHE CON ZIMPOL. LOCARNO, IRSOL, APRILE-MAGGIO 2016

FIGURA 13 - MISURE SPETTROPOLARIMETRICHE CON ZIMPOL. LOCARNO, IRSOL, APRILE-MAGGIO 2016

FIGURA 14–MICHELE BIANDA, RENZO RAMELLI, EVOLUZIONE E VARIABILITÀ DEL CAMPO MAGNETICO CROMOSFERICO E FOTOSFERICO SOLARE. IRSOL 2014

FIGURA 15 – WWW.IRSOL.CH

FIGURA 16 – WWW.IRSOL.CH

FIGURA 17 – FOTOGRAFIA DI MARIO GATTI

FIGURA 18 – FOTOGRAFIA DI MARIO GATTI

FIGURA 19 - FOTOGRAFIA DI MARIO GATTI