

Spettroeliografia digitale

Seconda edizione aggiornata

La Spettroscopia

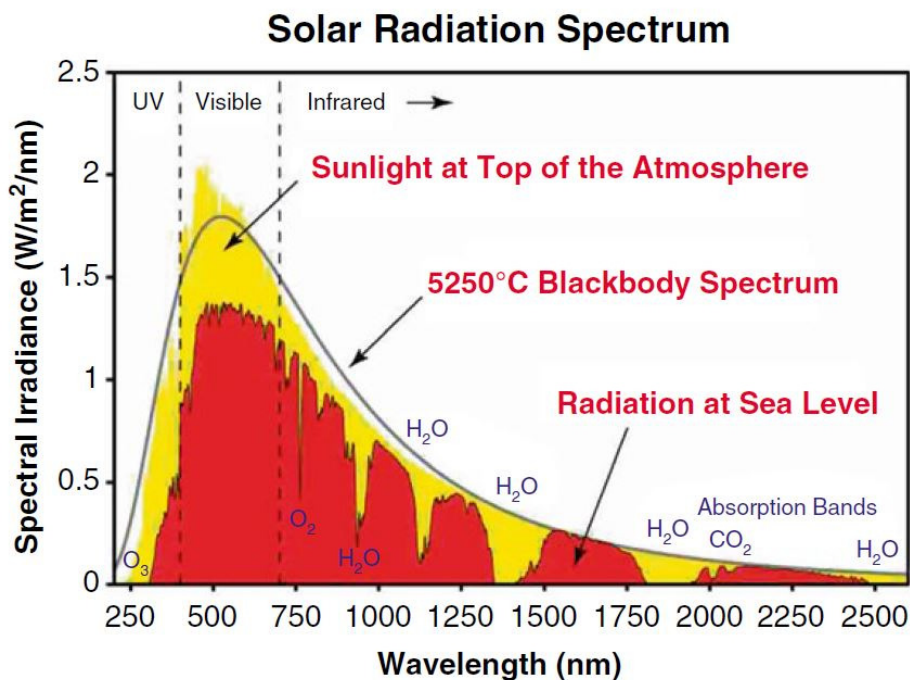
La spettroscopia è quella branca della fisica che studia gli spettri della radiazione elettromagnetica emessa o assorbita dalla materia. L'analisi spettroscopica permette di individuare la composizione chimica e lo stato fisico del corpo che emette la radiazione.

L'esperimento di Newton sulla scomposizione della luce bianca può essere considerato come l'inizio della ricerca spettroscopica moderna. Oltre tre secoli fa Isaac Newton (1642-1727) dimostrò infatti che la luce bianca solare poteva essere scomposta in luce di differenti colori usando un prisma. Egli scoprì anche che ad una più breve lunghezza d'onda corrispondeva un maggior angolo di rifrazione, e che lo spettro andava dal violetto al rosso. La spettroscopia, appena nata, sarebbe presto diventata il più potente mezzo di indagine dell'astronomia, uno straordinario mezzo di scoperta delle proprietà fisiche e chimiche delle stelle ed avrebbe poi prodotto risultati tali da far cambiare il volto dell'astrofisica e della nostra stessa esistenza con scoperte che hanno inciso profondamente sul tessuto concettuale e filosofico dell'universo che ci circonda.

Dopo i primi esperimenti sulla scomposizione della luce con un prisma di vetro compiuti, come si è detto, da Isaac Newton e da Francesco Maria Grimaldi nel seicento, un primo studio sistematico dello spettro solare venne effettuato nei primi anni dell'ottocento da Joseph Von Fraunhofer che catalogò 574 linee scure dello spettro solare, assegnando una lettera alle più evidenti (famose le H e K del Calcio e le C e F dell'idrogeno). Egli dimostrò anche che la distribuzione di energia del Sole varia in funzione della lunghezza d'onda, con un picco nel verde, intorno ai 500 nm. Non è quindi un caso se i sensori delle camere e reflex digitali presentano un'efficienza quantica maggiore proprio in tale zona dello spettro, nella quale, tra l'altro, l'occhio umano ha anche il massimo della sensibilità. Fraunhofer non fu in grado di dare una spiegazione al fenomeno delle righe scure nello spettro solare. Solo nel 1859 Gustav Kirchhoff lo interpretò come un assorbimento selettivo della luce da parte degli elementi chimici presenti nell'atmosfera solare. Kirchhoff dimostrò sperimentalmente che lo spettro dei corpi solidi, liquidi e dei gas ad alta pressione portati all'incandescenza sono continui, vale a dire che in essi i colori si susseguono senza interruzioni di sorta (spettro continuo), mentre i gas a bassa pressione portati all'incandescenza emettono un numero di

righe brillanti su sfondo scuro (spettro di emissione). Kirchhoff dimostrò anche che le righe scure prodotte da un gas, interposto tra uno spettro continuo e l'osservatore, occupavano la stessa posizione delle righe brillanti provocate dal medesimo gas portato all'incandescenza (spettro di assorbimento).

Facendo riferimento al quotidiano, un esempio classico di spettro continuo è quello di una comune lampada a incandescenza o alogena. Una lampada al mercurio o al neon possiede uno spettro a righe di emissione, mentre un esempio comune di spettro di assorbimento è quello solare.



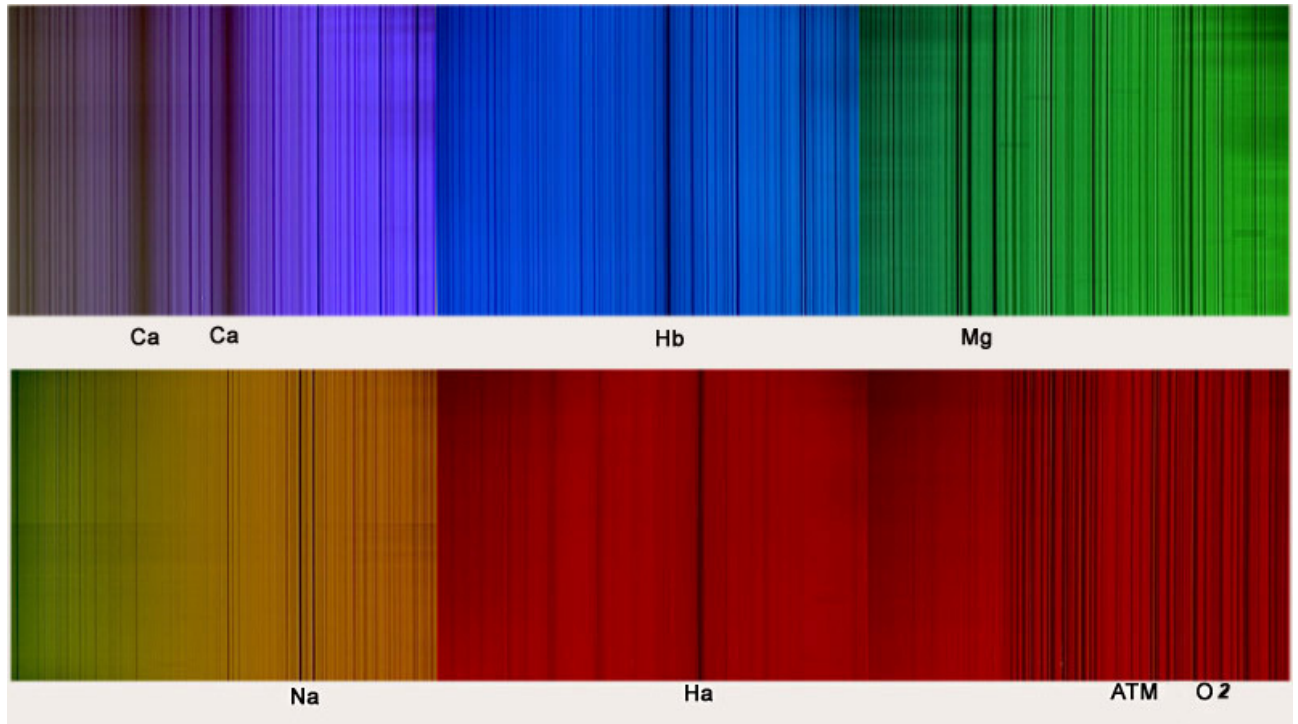
Distribuzione dell'energia del Sole in funzione della lunghezza d'onda,
(WIKI).

Dal grafico soprastante si possono anche desumere dati sulla distribuzione relativa di tale energia col 7% nell'UV ($< 3800 \text{ \AA}$), il 53% circa nel visibile ($3800-7000 \text{ \AA}$) ed il 40% nell'Infrarosso ($> 7000 \text{ \AA}$), il che dimostra l'assoluta necessità di osservare il sole con sistemi di filtraggio sicuri per la vista. Poichè il Sole può essere osservato ad alta risoluzione spaziale, è ovvio che non esiste un singolo spettro solare, ma esistono tanti spettri diversi che dipendono dal punto su cui è puntato il telescopio. Si può quindi distinguere fra lo spettro di un granulo, lo spettro di una zona intergranulare, lo spettro dell'ombra di una macchia, etc..

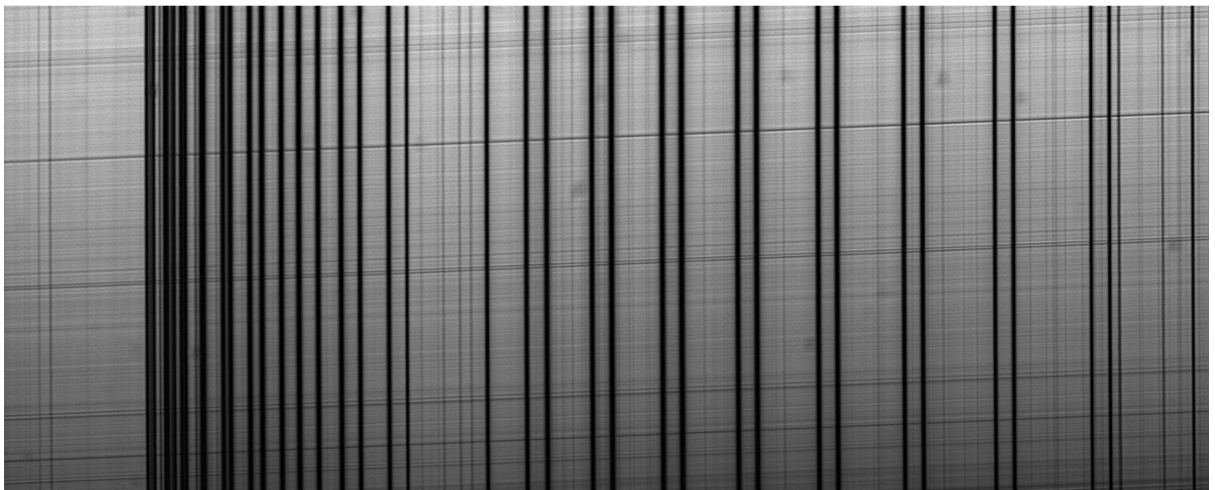
Per di più, esiste nello spettro solare un fenomeno di variazione con l'angolo eliocentrico per il quale uno spettro ottenuto al centro del Sole differisce, anche se in maniera non molto pronunciata, da uno spettro ottenuto al lembo. Lo spettro solare "standard" può essere ottenuto in due modi: o riprendere il centro del disco facendo attenzione a che non vi siano macchie nel campo di ripresa, ovvero riprendere il sole come stella, e precisamente una stella di classe G2V. Caratteristica anche del Sole, come delle altre stelle, è la brusca diminuzione dell'intensità spettrale verso il violetto alla lunghezza d'onda di 3646 \AA , cd "Balmer jump" o discontinuità di Balmer.

Lo spettro solare

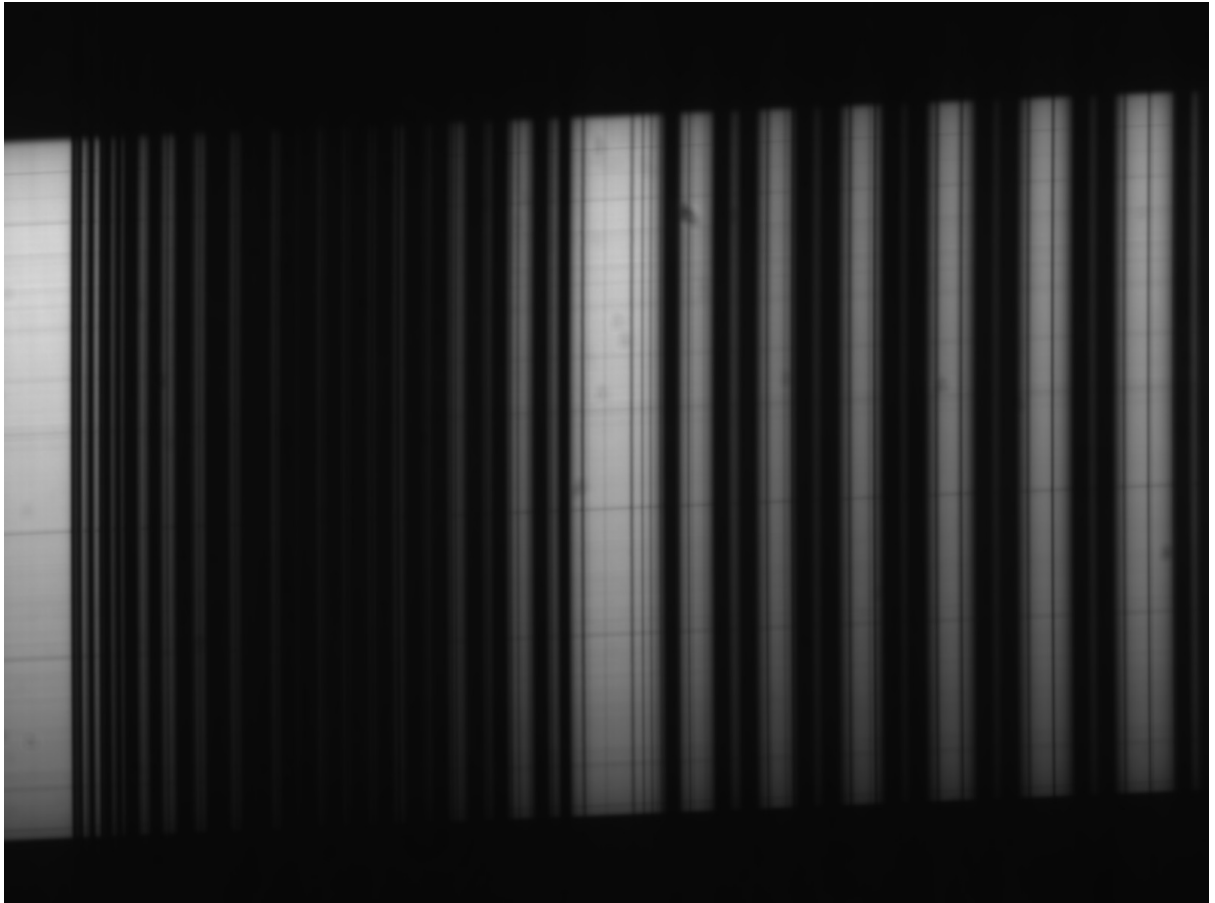
Lo spettro della luce solare appare ricco di righe di assorbimento anche con un modesto spettroscopio: alcune di esse sono effettivamente causate dal Sole, mentre altre appartengono all'atmosfera terrestre (righe telluriche). Lo spettro solare vero e proprio costituisce un laboratorio unico per gli appassionati di fisica e, perchè no, anche per gli appassionati di spettroscopia astronomica. Le righe della serie di Balmer dell'Idrogeno, del Calcio, del Magnesio e dell'Ossigeno diatomico sono evidenti ed appaiono, a media risoluzione, come nell'immagine sottostante (strumento TSA), foto dell'autore.



La maggior parte delle righe deboli appartengono al vapore acqueo (H_2O) e cambiano di intensità a seconda del grado di umidità, mentre altre appartengono all'Ossigeno diatomico (O_2), queste ultime concentrate in gran parte nel rosso profondo ai confini dell'IR, a 6800 e 7600 Å (nell'ordine, la prima e la seconda delle figure sottostanti).



O_2 a 6800 Å



O₂ a 7600 Å

Ma l'osservazione delle righe e dei colori dello spettro solare non è fine a se stessa. Essa ci fornisce preziosi elementi di conoscenza ed informazione su:

1-Gli elementi chimici presenti sul Sole, dato che le righe associate ad una data lunghezza d'onda costituiscono delle vere e proprie impronte digitali caratteristiche di ogni singolo elemento.

2-L'abbondanza atomica dell'elemento, dedotta dall'intensità delle righe.

3- La temperatura alla quale si trovano gli elementi relativi alla riga o le loro transizioni atomiche, dato che le transizioni ai diversi livelli atomici avvengono a temperature diverse. La temperatura è derivata anche dalla larghezza della riga interessata.

4-Il campo magnetico della regione studiata grazie all'effetto Zeeman che provoca lo splitting (divisione in 2 o 3 parti) delle righe sensibili ai campi magnetici.

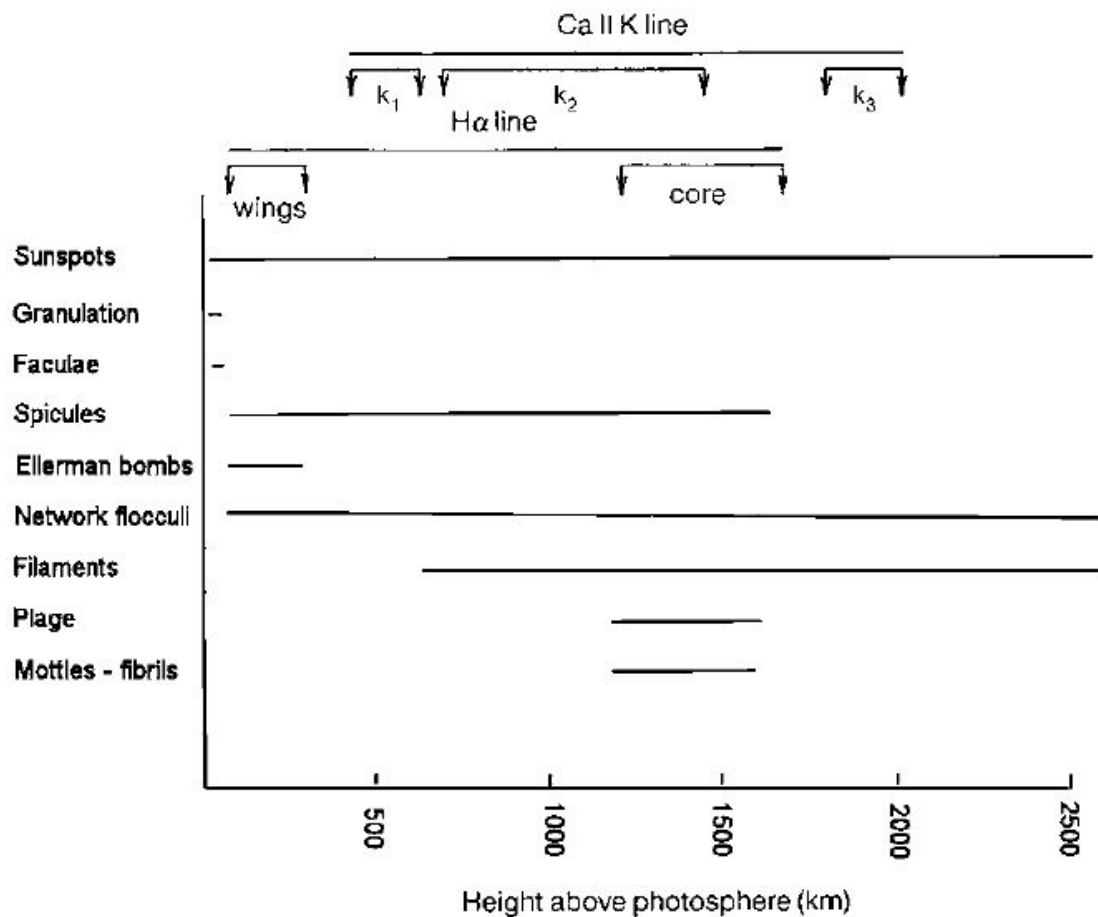
5-Il moto del plasma solare rispetto all'osservatore per effetto Doppler.

Nella figura che segue (fonte NASA- Skylab) è mostrato il diagramma della fotosfera, cromosfera, e corona solare in base all'altezza, temperatura e densità. Da essa si può osservare il punto nel quale si collocano determinati fenomeni e le popolazioni atomiche di dati elementi.

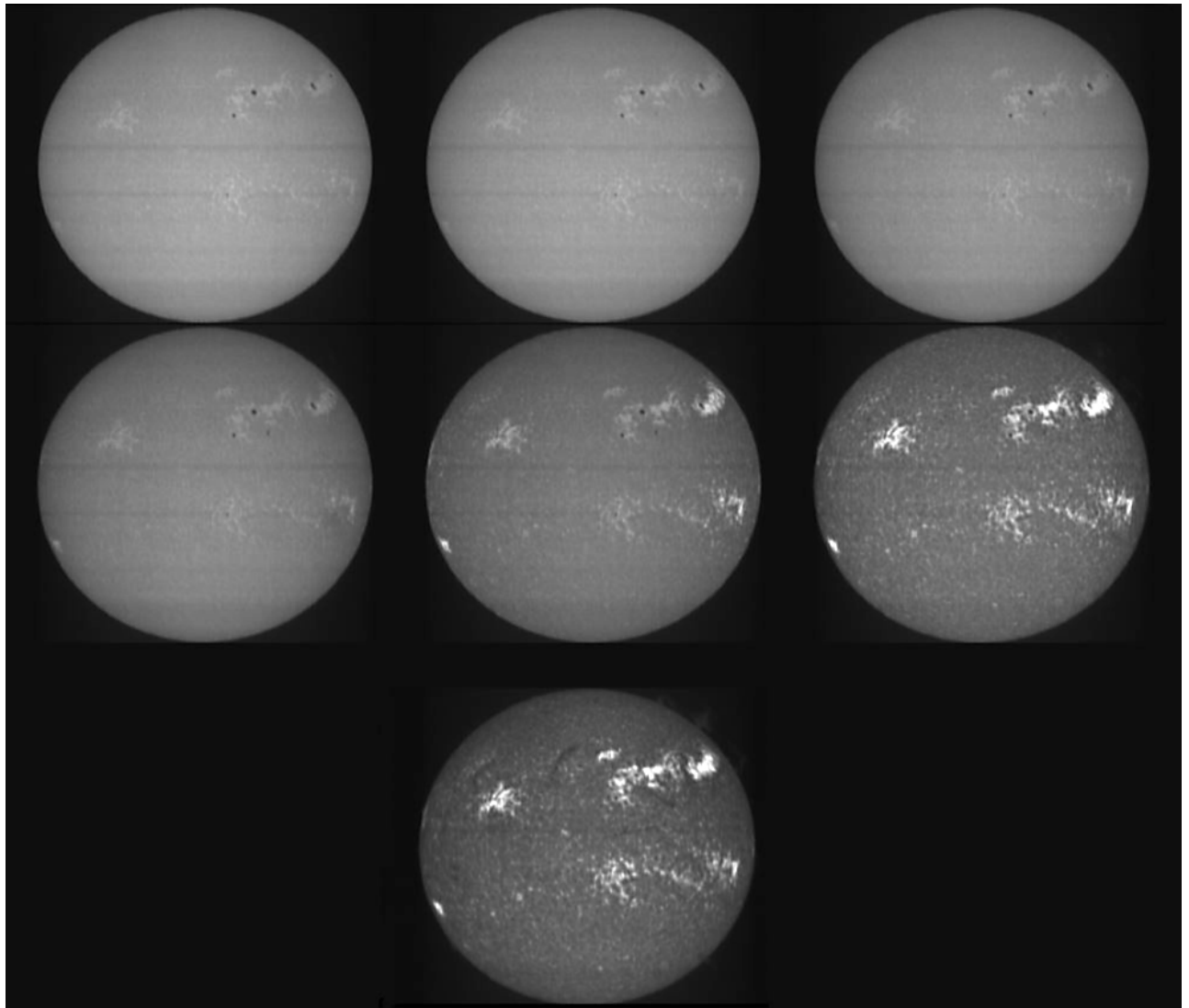
Wavelength (nm)	Name	Species	Equivalent width (nm) Disk Centre	Region	Height above Photosphere (Km)	Temp (K)
Soft X-rays				Corona	>5000	2,000,000
121.57	Lyman α	H		Upper chromosphere	2200	20,000
155		C IV		Transition region	2500	100,000
279.54	k	Mg II	2.2	UV emission, high chromosphere	500-1600	
280.23	h	Mg II	2.2			
388.36	(CN band head)	CN	0.03 (index)	Photosphere, magnetic field tracer		
393.36	K	Ca II	2	Chromosphere, flares, prominences	600-1500	
396.85	H	Ca II	1.5	Chromosphere, flares, prominences	1000-2000	
430.79	G band	CH (Fe I, Ti II)	0.72	Photosphere, flares, magnetic field tracer		
517.27	b2	Mg I	0.075	Low chromosphere		
518.36	b1	Mg I	0.025			
525.02		Fe I	0.007	Photosphere, magnetic fields (g=3)		
537.96		Fe I	0.0079	Medium photosphere		
538.03		C I	0.0025	Low photosphere		
557.61		Fe I		Photosphere, velocity fields (g=0)		
587.56	D3	He I		Chromosphere, flares, prominences		
589	D2	Na I	0.075	Upper photosphere, low chromosphere, prominences		
589.59	D1	Na I	0.056	Upper photosphere, low chromosphere, prominences		
612.22		Ca I		Photosphere, magnetic fields (g=1.5)		
630.25		Fe I	0.0083	Photosphere, magnetic fields (g=2.5)		
656.28	C (H α)	H I	0.41	Chromosphere, prominences, flares	1250-1700	
676.78		Ni I		Photosphere, oscillations		
769.89		K I		Photosphere, oscillations		
777.42		O I	0.0066	High photosphere		
849.8	Calcium 'infrared triplet'	Ca I	0.13	Low chromosphere, prominences		
854.21	Calcium 'infrared triplet'	Ca I	0.37	Low chromosphere, prominences		
866.2	Calcium 'infrared triplet'	Ca I	0.27	Low chromosphere, prominences		
868.86		Fe I	0.014	Photosphere, magnetic fields (g=1.7)		
1006.37		FeH		Umbral (only) magnetic fields (g=1.22)		
1083.03		He I	0.003	High chromosphere		
1281.81	H Paschb	H I	0.19	Chromosphere		
1564.85		Fe I	0.0035	Photosphere, magnetic fields (g=3)		
1565.29		Fe I	0.003	Photosphere, magnetic fields (g=1.8)		
2281.06		Ti I		Umbral (only) magnetic fields (g=2.5)		
4652.55	H Pfundb	H I		Chromosphere, electric fields		
4666.24		CO		High photosphere, thermal structure		
12318.3		Mg I		High photosphere, magnetic fields (g=1)		

Per chiarire ulteriormente il concetto, il diagramma che segue ci mostra come determinati fenomeni fisici presenti sul sole (macchie, facole, filamenti, plages, etc) presentano un diverso aspetto non solo a seconda dell'elemento nella cui luce sono registrati od osservati (ad esempio Idrogeno alfa o Calcio ionizzato) ma anche se l'osservazione viene effettuata al centro della riga dei predetti elementi o sulle ali, in quanto andando dalle ali verso il centro riga vuol dire andare verso la parte alta della cromosfera e salire verso temperature più elevate.

Come si osserva nel diagramma, la parte centrale della riga CaII K (CaII K3) si colloca nella parte più alta della cromosfera, intorno ai 2000 Km sulla fotosfera, ai confini della zona di transizione: non solo, ma andando dal bordo verso il centro di questa interessantissima riga, si opera una vera e propria tomografia della cromosfera, andando da 500 ad oltre 2000 Km sopra la fotosfera e passando da 5500 K circa a quasi 10.000 K di temperatura.



Un'evidente dimostrazione di quanto precedentemente accennato è la sequenza di immagini del disco solare che va dall'estremità dell'ala verso il blu della riga CaIIK ai confini del continuo, sino al centro (CaII K3) della riga stessa. Risulta drammatico l'intensificarsi della brillantezza delle facole e la visibilità dei filamenti sul disco man mano che si procede verso il centro della riga e quindi verso la parte più alta della cromosfera. Sequenza di immagini ottenute dall'autore con lo spettroeliografo digitale autocostruito VHIRSS.



Come si vedrà, quindi, la spettroeliografia non è solo un semplice sostituto dei filtri a banda stretta che vanno per la maggiore, ma uno strumento scientifico che ci permette di analizzare ciascuna riga solare, dalle ali al centro, operando una precisa scansione dell'atmosfera solare. Ora, le righe solari sono migliaia, addirittura 24000 quelle comprese nell'atlante di Charlotte Moore ed altri , liberamente scaricabile nel testo originale al link: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph61.pdf>

Alcune di esse sono duplicate e triplicate, ovvero troppo deboli per essere registrate con mezzi amatoriali. Tuttavia, ad avviso di chi scrive, quelle potenzialmente esplorabili con spettroeliografi professionali ad altissima risoluzione potrebbero anche essere 7-8000. Le più importanti di queste, circa una cinquantina: del Ferro, dell'Idrogeno, del Calcio, del Magnesio, del Sodio, dell'Elio, grosso modo qualcuna in più di quelle riportate nella tabella che segue (fonte Columbia University, N.Y) si prestano ad essere registrate da strumenti amatoriali a medio-alta risoluzione.

Nella tabella sono riportate anche l'ampiezza in nm delle righe, importante ai fini della spettroeliografia, come si vedrà in seguito.

Table 2. More Spectral Lines. (Note: 1 nm equals 10 Angstrom)

Wavelength (nm)	Line Width (nm)	Element		Wavelength (nm)	Line Width (nm)	Element
393.3682	2.0253	Ca II		440.4761	0.0898	Fe I
394.4016	0.0488	Al I		441.5135	0.0417	Fe I
396.1535	0.0621	Al I		452.8627	0.0275	Fe I
396.8492	1.5467	Ca II		455.4036	0.0159	Ba II
404.5825	0.1174	Fe I		470.3003	0.0326	Mg I
406.3605	0.0787	Fe I		486.1342	0.3680	H
407.1749	0.0723	Fe I		489.1502	0.0312	Fe I
407.7724	0.0428	Sr II		492.0514	0.0471	Fe I
410.1748	0.3133	H		495.7613	0.0696	Fe I
413.2067	0.0404	Fe I		516.7327	0.0935	Mg I
414.3878	0.0466	Fe I		517.2698	0.1259	Mg I
416.7277	0.0200	Mg I		518.3619	0.1584	Mg I
420.2040	0.0326	Fe I		525.0216	0.0062	Fe I
422.6740	0.1476	Ca I		526.9550	0.0478	Fe I
423.5949	0.0385	Fe I		532.8051	0.0375	Fe I
425.0130	0.0342	Fe I		552.8418	0.0293	Mg I
425.0797	0.0400	Fe I		588.9973	0.0752	Na I (D ₂)
425.4346	0.0393	Cr I		589.5940	0.0564	Na I (D ₁)
426.0486	0.0595	Fe I		610.2727	0.0135	Ca I
427.1774	0.0756	Fe I		612.2226	0.0222	Ca I
432.5775	0.0793	Fe I		616.2180	0.0222	Ca O
434.0475	0.2855	H		630.2499	0.0083	Fe I
438.3557	0.1008	Fe I		656.2808	0.1020	H

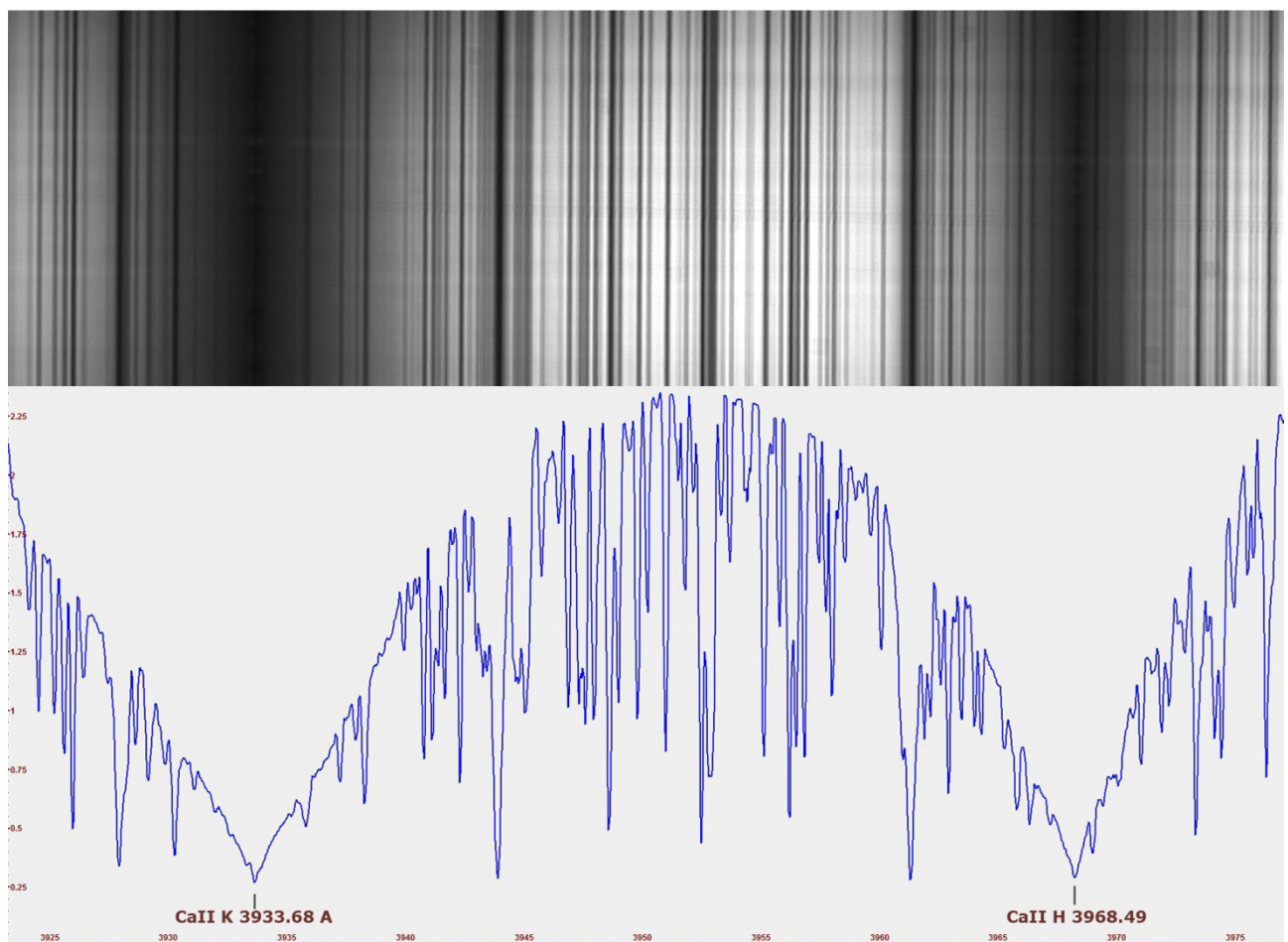
Ma già una cinquantina di righe relativamente facili (forse un centinaio comprese quelle un pò più difficili), ci fa comprendere l'estrema utilità e versatilità dello spettroeliografo: ammesso fossero disponibili, e non lo sono, quanto potrebbero costare all'amatore 50-100 filtri interferenziali solari a banda molto stretta? Sicuramente cifre oscillanti tra i 200 e i 400000 €, senza contare che filtri a banda così stretta da selezionare righe o parti di riga da 1/50 di Å probabilmente non potrebbero essere disponibili per l'amatore.

Le più importanti righe dello spettro solare

Di seguito gli spettri in alta risoluzione degli elementi più importanti, presenti nella cromosfera solare, con le lunghezze d'onda di riferimento (strumenti VHIRSS e POSS2 dell'autore).

Le righe del Calcio ionizzato CaII K e H

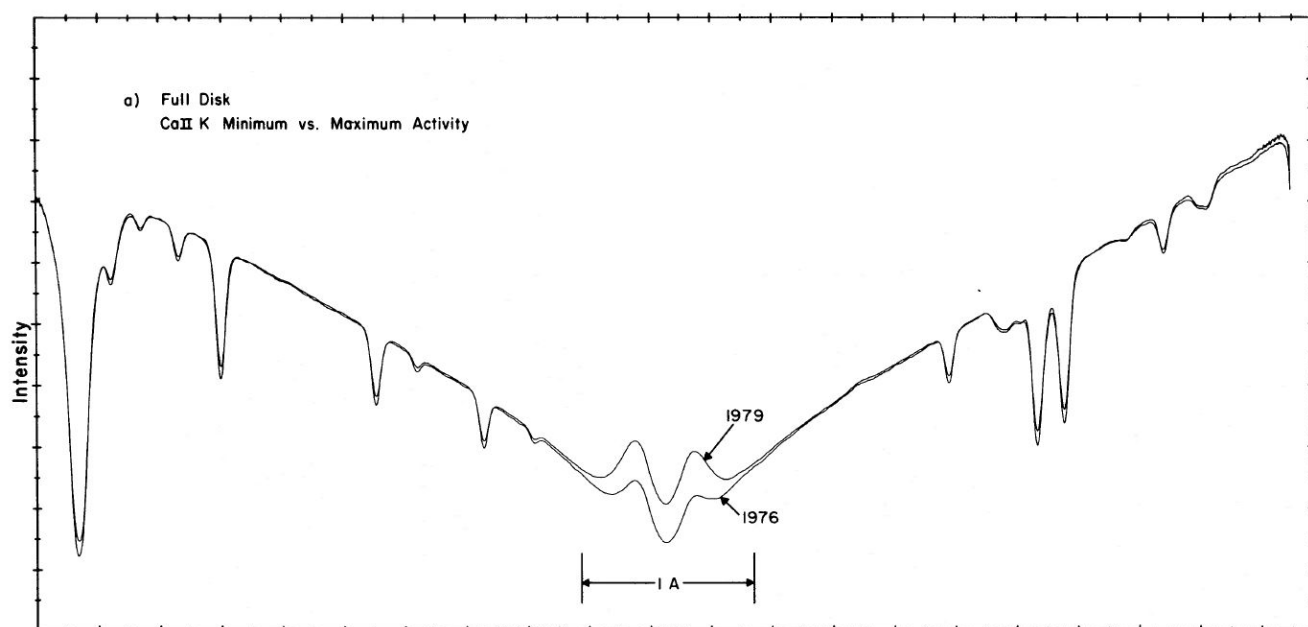
POSS2 CaII K & CaIIH lines



Le righe CaII K e H nel vicino UV riprese con lo spettrografo Hires POSS 2.

La riga CaII K riveste molta importanza nello studio dell'attività solare e della cromosfera in particolare. L'NSO (National Solar Observatory) di Sacramento Peak in Arizona (USA) ha effettuato per un lungo periodo di tempo, dal 1976 al 2015, un'attività di monitoraggio della riga in questione, valutando, tra l'altro, i parametri dell'indice di emissione

(EM) corrispondente alla EW (Equivalent Width) di un intervallo di 1 \AA centrato sulla riga, ed i valori di intensità del core K3 (0.15 \AA) della riga stessa. Dall'ottobre 2015 il programma di monitoraggio di Sacramento Peak è stato sospeso, in quanto si utilizzano ora i dati del progetto SOLIS - ISS (Integrated Sunlight Spectrometer), attivo presso l'NSO - Kitt Peak, uno spettrografo capace di risoluzione $R=300000$ e di un range di lunghezza d'onda da 350 a 1100 nm. Il monitoraggio si estende anche alla riga CaII H.



Un esempio della variazione di intensità del core di 1 \AA della riga CaIIK attraverso il ciclo 21, dal minimo al massimo. (fonte: "Solar luminosity Variations .Calcium K variations in cycle 21"-White e Livingstone-1981).

Oltre che nell'ultravioletto, la riga del calcio ionizzato appare anche nel vicino infrarosso, a $8498, 8542$ e 8668 \AA (tripletto del Calcio), la più usata dai professionisti, quella a 8542 , risulterebbe tuttavia piuttosto difficile da riprendere per un amatore, non tanto per lo spettroscopio, che necessiterebbe di un reticolo ottimizzato per l'IR, quanto per la scarsa sensibilità delle camere amatoriali a tale lunghezza d'onda. La diffusione, tuttavia, negli ultimi tempi, di camere CMOS con sensori Sony retroilluminati ha un po' mutato la situazione, rendendo disponibili anche camere con un'elevata sensibilità nell'IR vicino.

Le righe dell'Idrogeno osservabili sul Sole.

Lo spettro dell'idrogeno è il più semplice degli spettri dato che tale elemento è costituito dal nucleo contenente un protone intorno al quale si muove un solo elettrone. Gli elettroni si muovono in orbite ad energia quantizzata. L'orbita 1s è quella più interna, stato fondamentale, a cui corrisponde il minimo di energia. Se l'elettrone che si trova in un'orbita ad alta energia passa ad una ad energia minore rilascia una radiazione avente una determinata lunghezza d'onda, dando origine ad una riga di emissione.

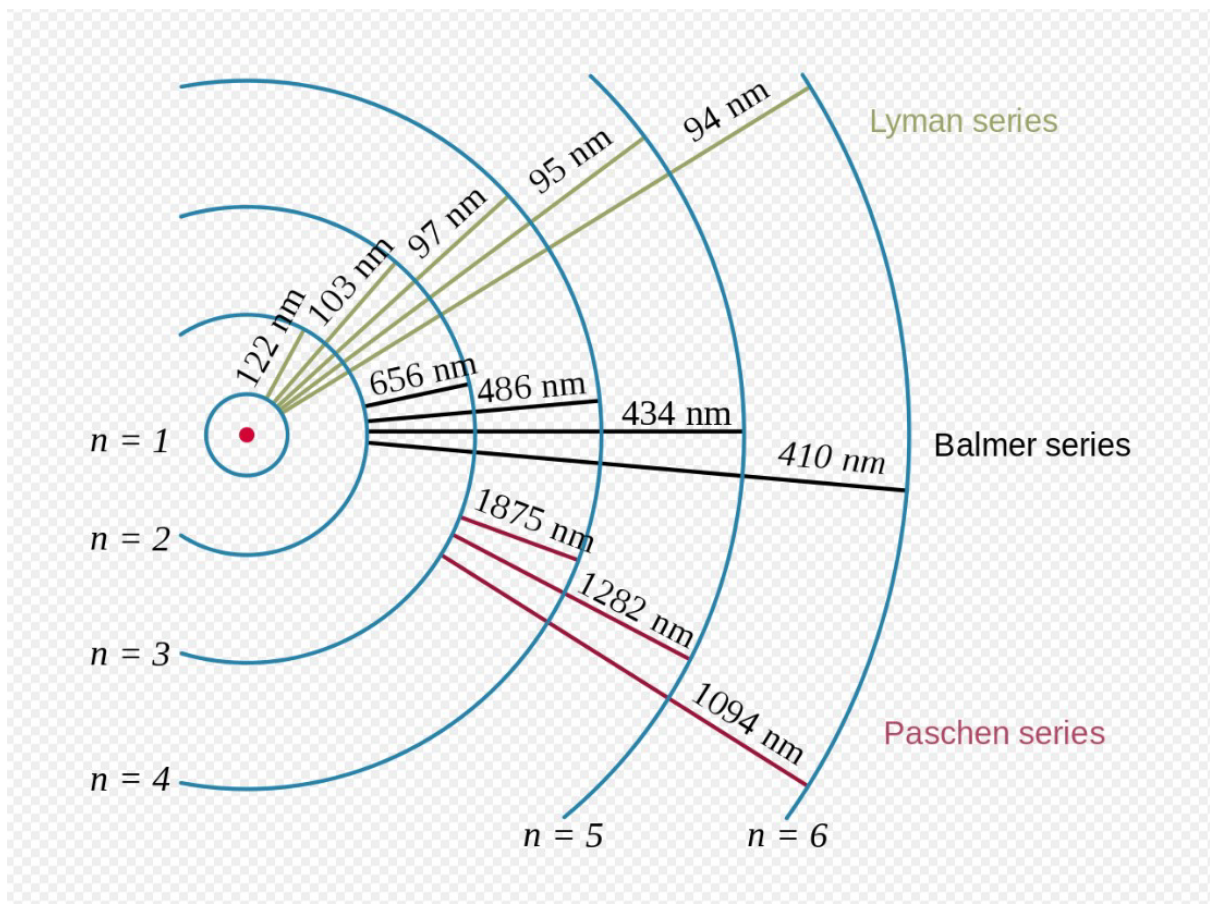
Le transizioni che gli elettroni compiono dalle orbite periferiche a quelle più interne si possono ordinare secondo valori decrescenti di energia: le variazioni più elevate si registrano quando un elettrone passa da un'orbita periferica a quella corrispondente allo stato fondamentale. L'insieme di tutti i salti che terminano nell'orbita 1s dà luogo a una serie di righe spettrali che prendono il nome di serie di Lyman, le prime righe della quale vengono indicate con L_α , L_β , L_γ e corrispondono alle righe dell'ultravioletto.

A valori di energia immediatamente più bassa si trovano i salti dell'elettrone dalle orbite periferiche alla seconda orbita stazionaria: si hanno energie proprie dello spettro del visibile e si ottengono righe della serie di Balmer. La prima riga è originata da un salto dall'orbita 3 all'orbita 2 e viene indicata con H_α , la seconda dalla 4 alla 2 e viene indicata con H_β mentre la terza indicata con H_γ corrisponde al salto dall'orbita 5 alla 2 e così via. Lo stesso discorso si ripete per la serie di Paschen le cui righe corrispondono all'energia delle righe dell'IR.

Serie di transizione dell'Idrogeno

<i>Livello più basso</i>	<i>transizione principale</i>
$n = 1, \text{ Lyman}$	$L_\alpha = 1216\text{\AA}$
$n = 2, \text{ Balmer}$	$H_\alpha = 6563\text{\AA}$
$n = 3, \text{ Paschen}$	$P_\alpha = 18750\text{\AA}$

Nella figura che segue lo schema dei livelli energetici e delle principali serie dell'atomo di idrogeno (fonte Wikipedia-Hydrogen spectral series).



la serie di Balmer nel visibile è senza dubbio la più interessante dal nostro punto di vista, anche perché l'idrogeno ionizzato H alpha a 6562.8 Å costituisce l'elemento di gran lunga più abbondante

nell'atmosfera solare, la cromosfera, dandogli peraltro il colore rosso che la contraddistingue.

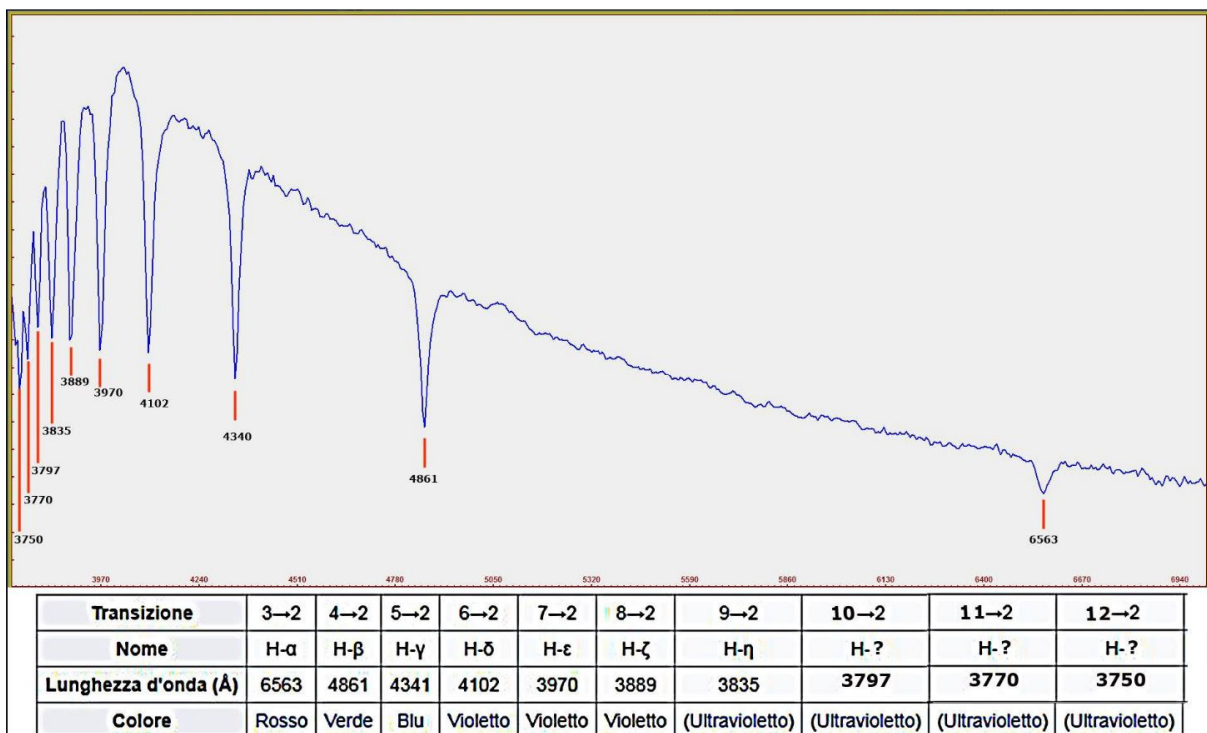
La formula di Balmer per la serie che da lui prende il nome, nel visibile, è la seguente:

$$\lambda = B \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

dove B è il limite di Balmer a 3646 Å; m è un qualsiasi intero m > n
Sotto, lo spettro di assorbimento della serie di Balmer dell'Idrogeno da me calcolato sulla stella Vega sino alla transizione 12 > 2 (spettro dell'autore):

Ad esempio, per la transizione 10 > 2 è :

$$3646 \times \left(\frac{100}{96} \right) = 3797 \text{ Å}$$



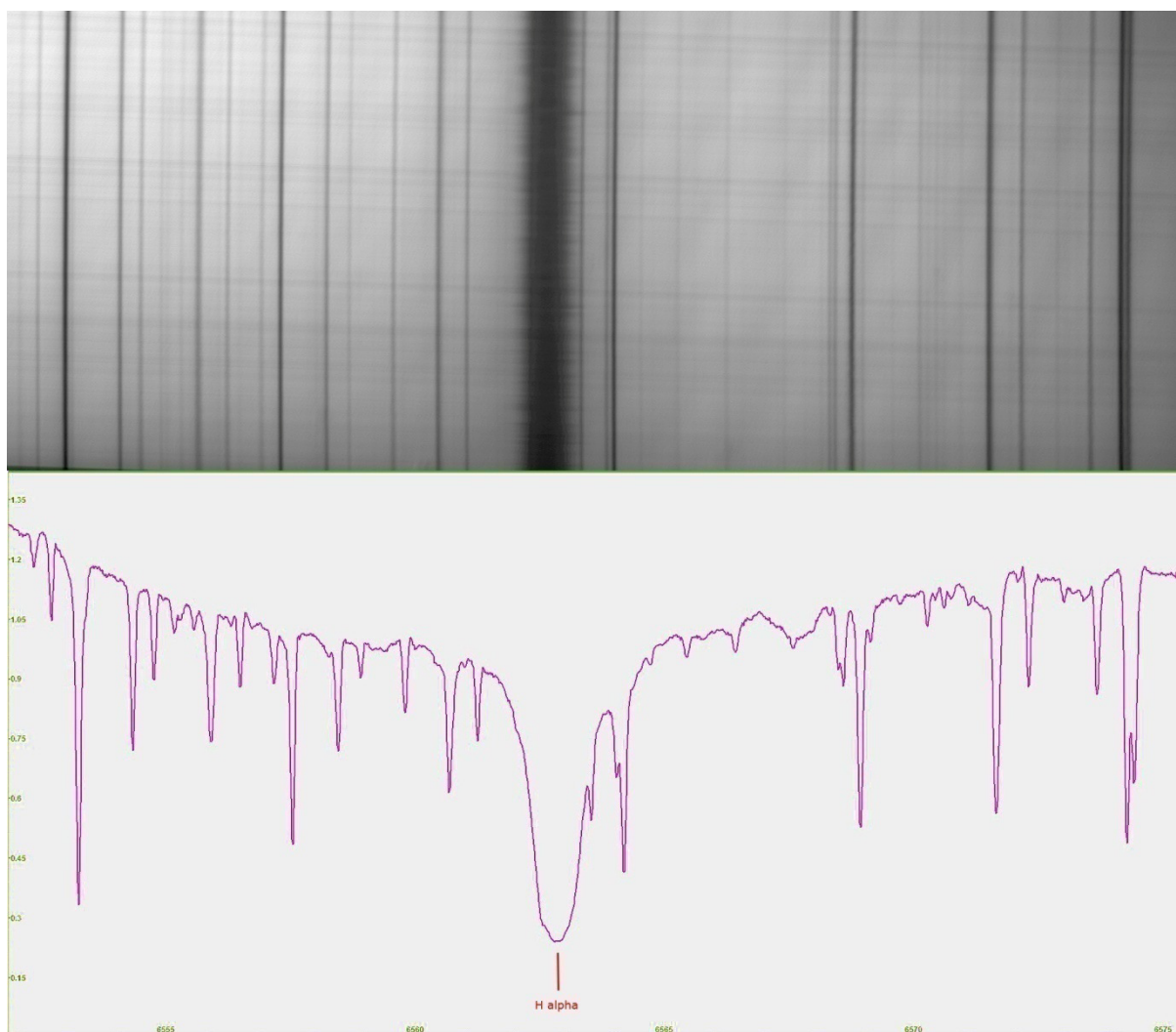
La riga H alpha

Come si è detto, la transizione $3>2$ dell'Idrogeno a 6562.8 \AA (riga H α) costituisce l'elemento che caratterizza la cromosfera e le dà il caratteristico colore rosso profondo, che si osserva facilmente in occasione delle eclissi totali, sul bordo solare, come nell'immagine che segue dell'astrofilo Danilo Pivato ripresa in occasione dell'eclisse del 2017.

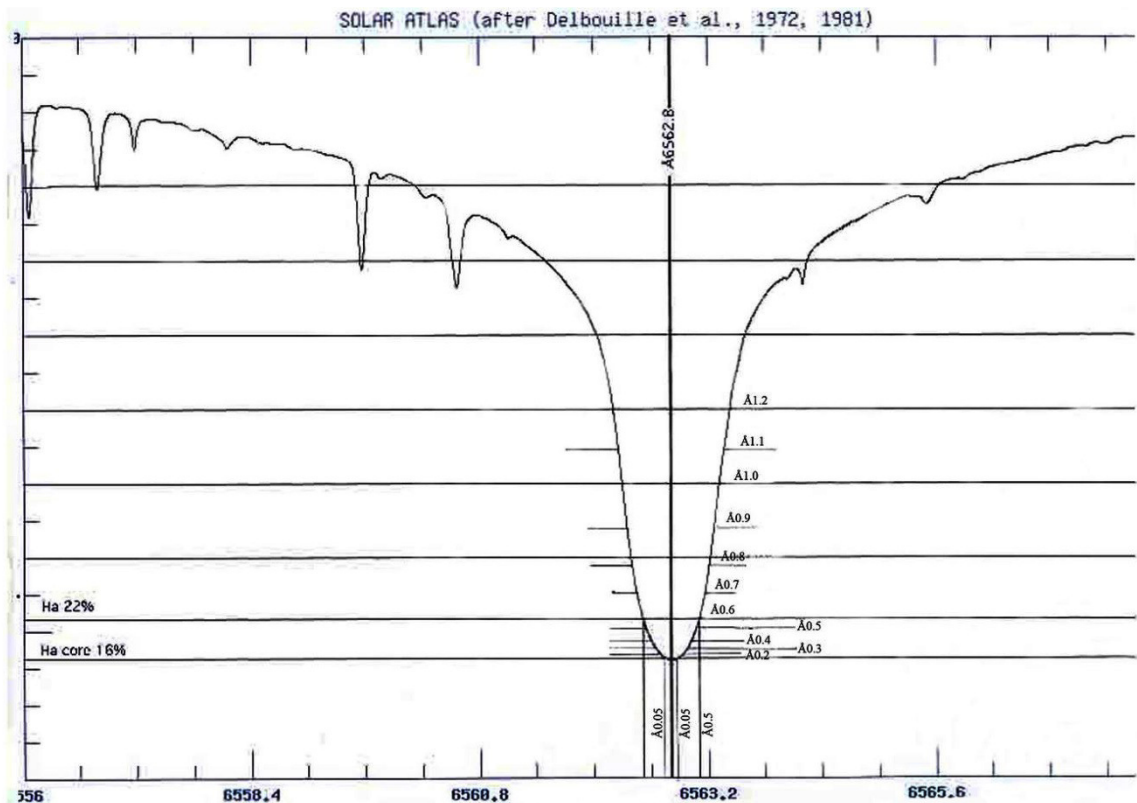


Mentre le ali della riga provengono dalla bassa cromosfera, quasi al confine con la fotosfera, la parte centrale della stessa attiene all'alta cromosfera, mediamente intorno ai 1500 Km.

In alta risoluzione (strumento VHIRSS) la riga H α in assorbimento appare come segue.



Profilo della riga H α in assorbimento con la estensione in Angstrom del core e delle ali: come si osserva la FWHM è mediamente di 1-1.2 Å (fonte: Debouille Solar Atlas_ Bass 2000).



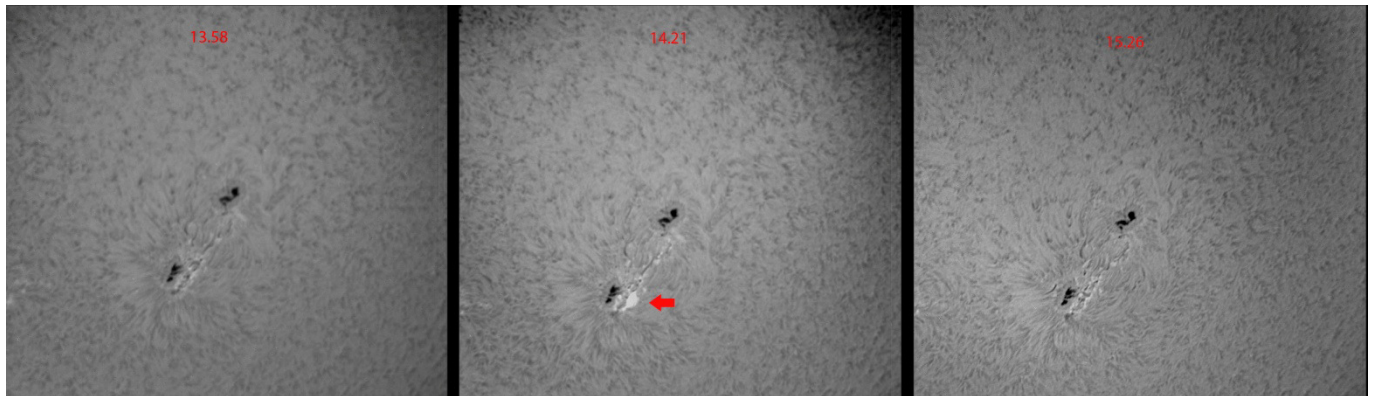
La riga H α si può quindi considerare la più importante, insieme a quelle del Calcio ionizzato, per lo studio della cromosfera solare e dei fenomeni che in essa avvengono. E' anche la più facile da identificare da parte dei meno esperti in spettroscopia solare.

La riga H β

La riga H β a 4861.34 Å sembrerebbe a prima vista meno importante per lo studio dell'atmosfera solare, sia per la minore estensione rispetto all'H α che per l'attenuazione dei particolari stessi, in primis plages e filamenti. Tuttavia occorre valutare la buona

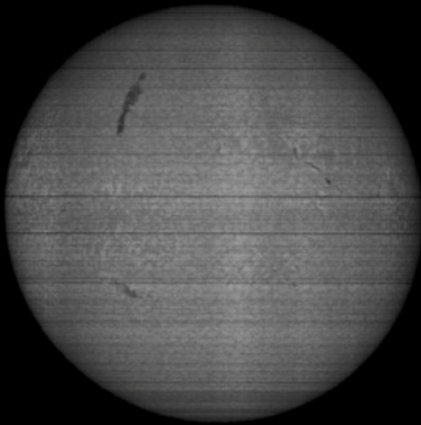
osservabilità negli spettroeliogrammi in tale riga dei flares solari. Chi scrive, partecipando alla survey professionale "F-Croma" ha potuto verificare tale caratteristica con un piccolo flare osservato il 27 settembre 2015.

Questo perché , apparendo le plages più scure, i fenomeni esplosivi di plasma come i flares tendono ad essere più evidenti.

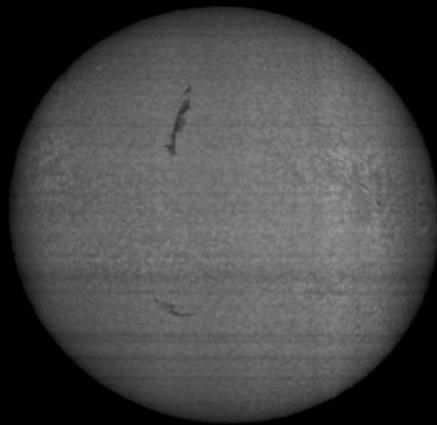


Nell'immagine che segue la sequenza delle osservazioni in luce H β da me effettuate durante tale campagna osservativa con VHIRSS.

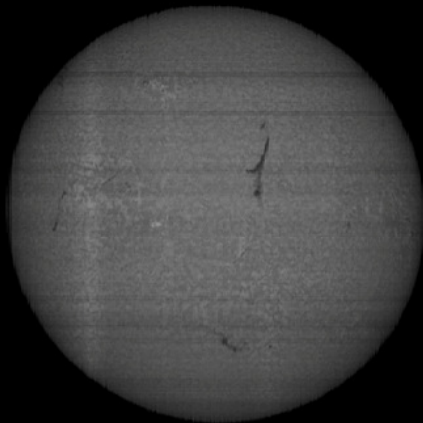
15-09-21



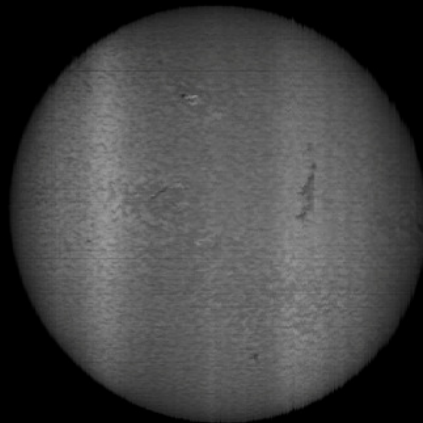
15-09-22



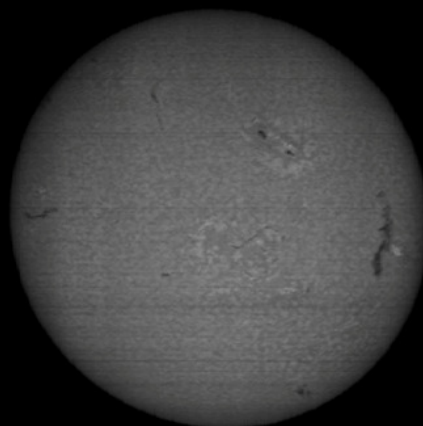
15-09-24



15-09-25

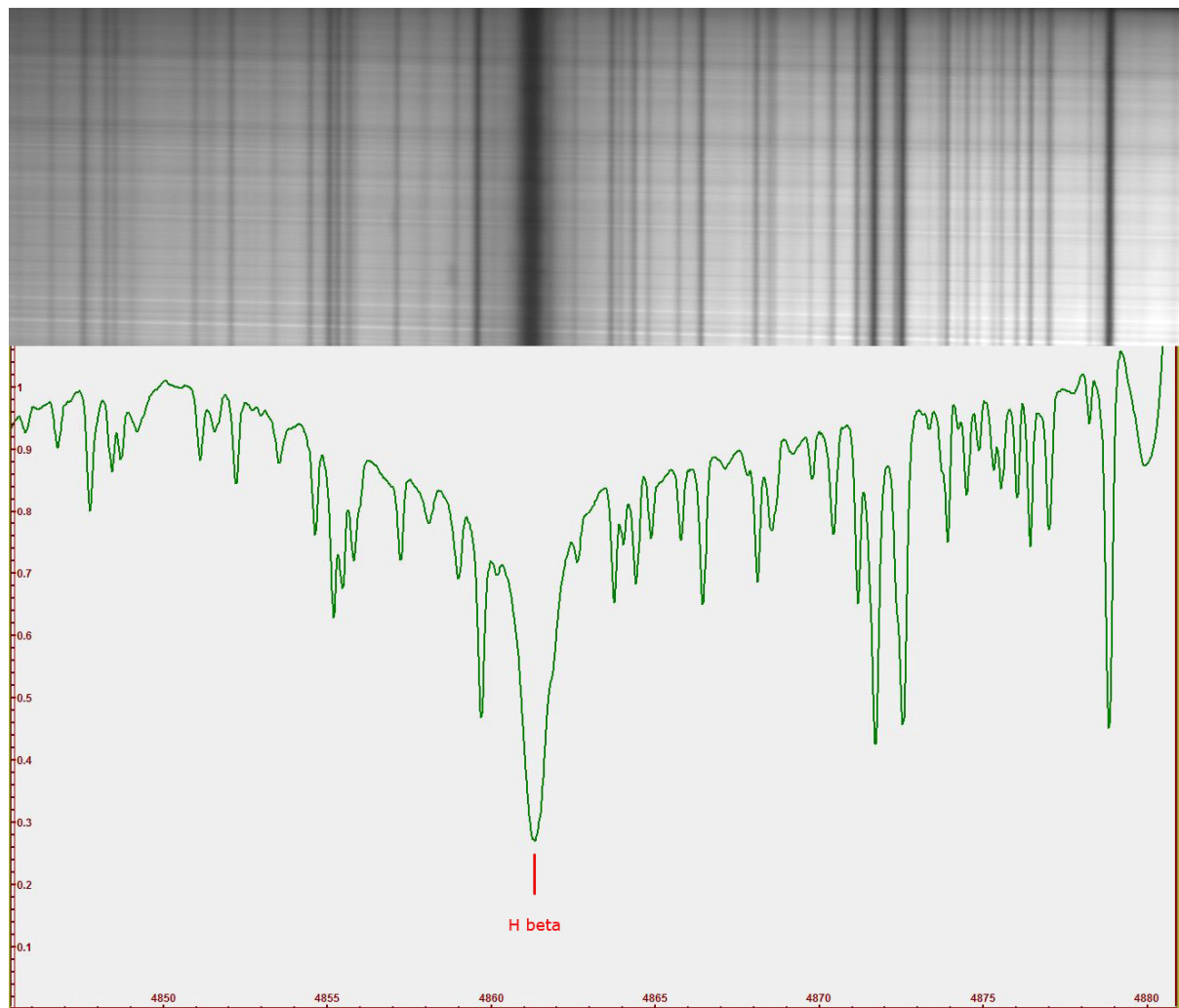


15-09-27



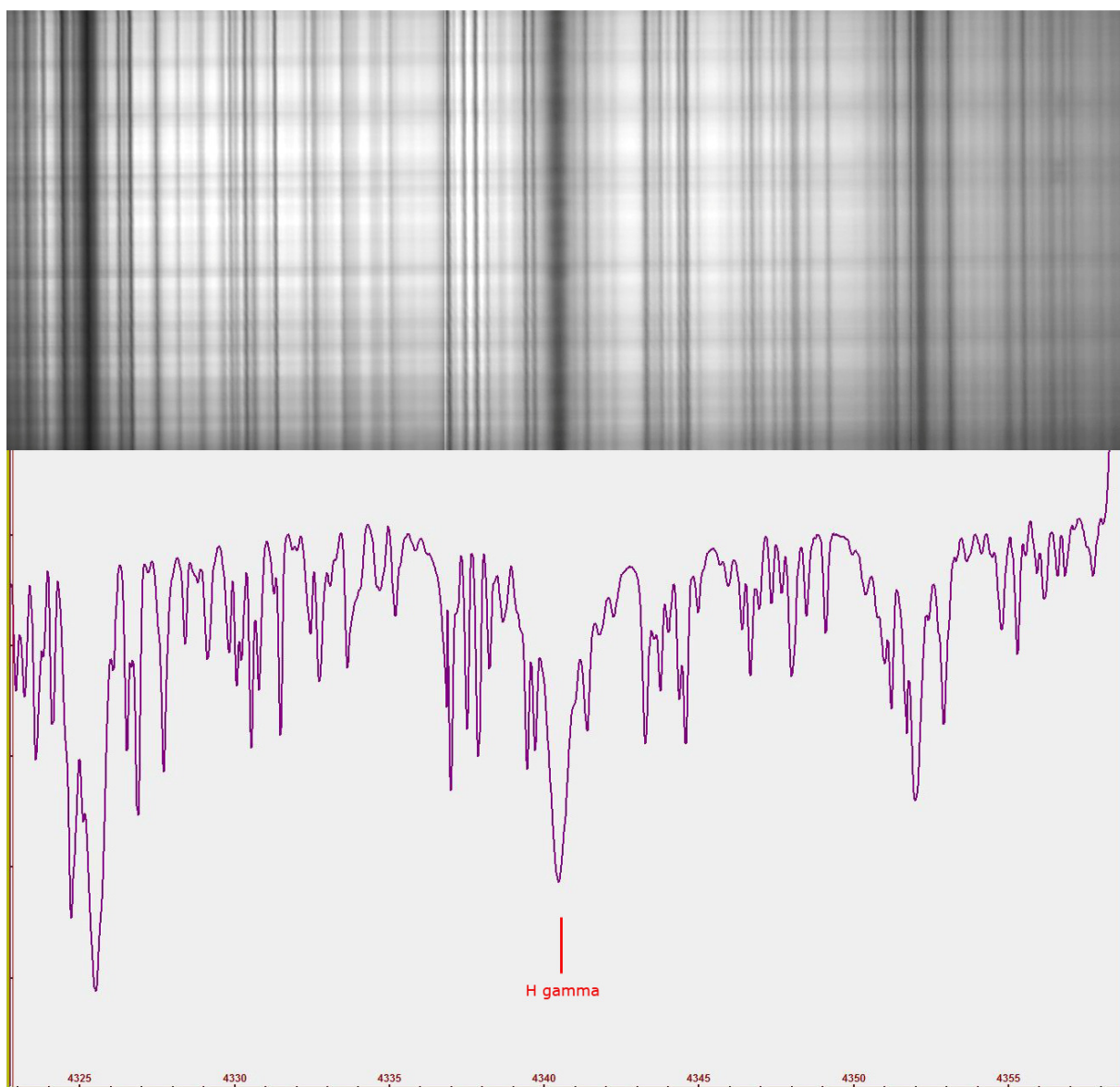
Sun in Hbeta light 486 Nm and AR 12 422 evolution September 21-27-2015 -
VHIRSS digital spectrohelioscope Fulvio Mete, Rome, Italy

Nell'immagine sottostante la riga $H\beta$ come ottenuta al fuoco di VHIRSS.



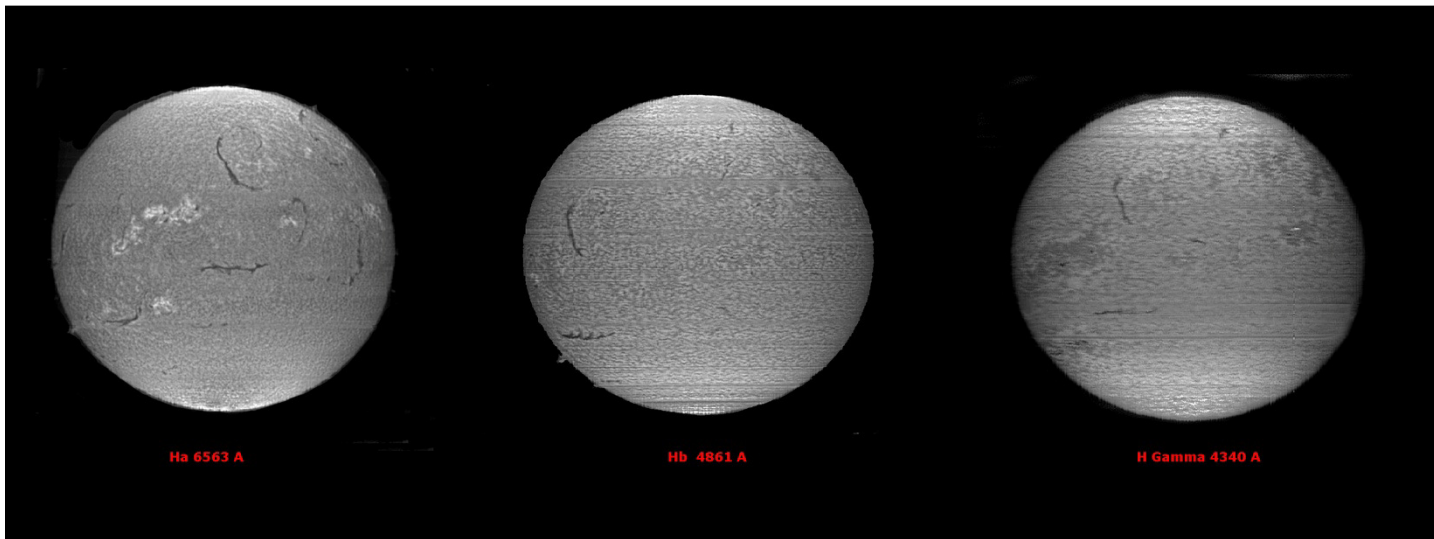
La riga H γ

Anche per la riga H γ a 4340.47 Å vale il discorso della riga H β , nel senso che negli spettroeliogrammi ottenuti in questa riga i particolari visibili sono molto meno brillanti ed evidenti rispetto alle altre due.



Nell'immagine è mostrato il confronto tra gli spettroeliogrammi ottenuti con VHIRSS nelle tre righe dell'Idrogeno in precedenza citate: è di tutta evidenza che, andando dall'Idrogeno alfa nelle lunghezze d'onda inferiori le plages perdono il colore brillante per passare a

tonalità di grigio sempre più scure, mentre i filamenti perdono contrasto.

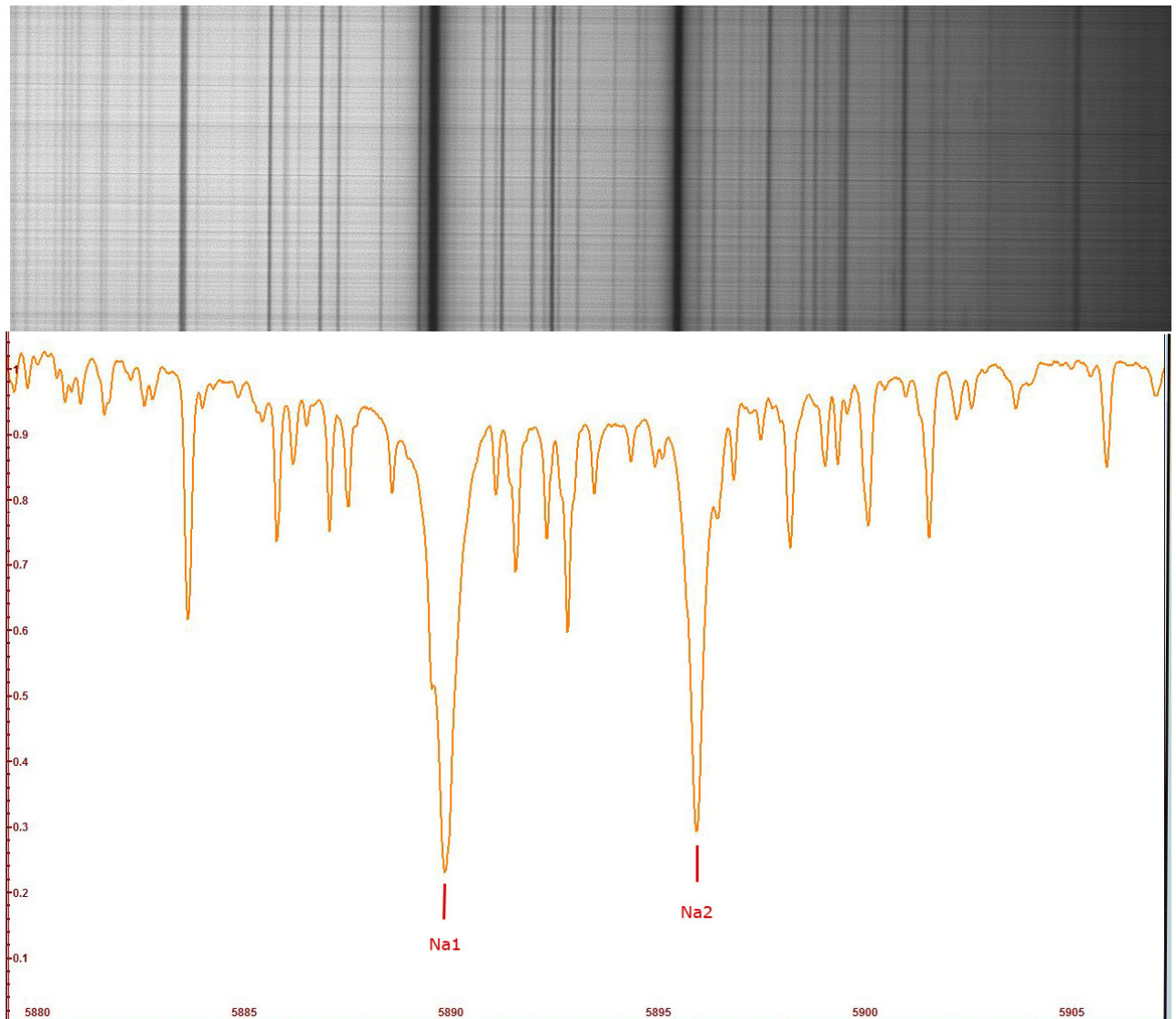


Le righe Na 1 e 2 (doppietto del sodio).

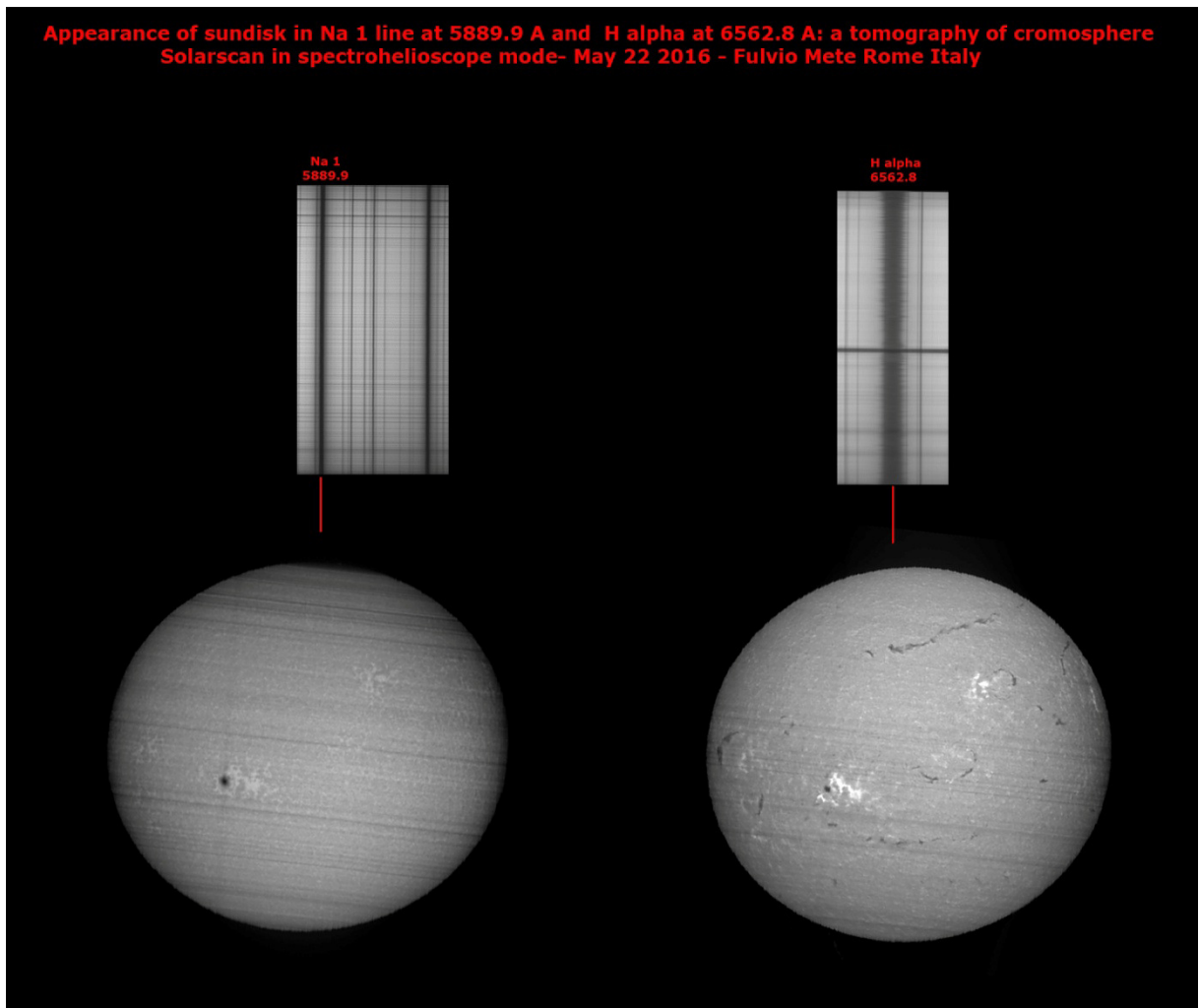
Tali righe, rispettivamente a 5889.97 e a 5895.94 Å, a bassa eccitazione, appartengono alla parte inferiore della cromosfera e sono evidenti quando la bassa cromosfera è riscaldata, spesso mostrando così il nucleo della fase impulsiva dei flares, oppure le facole.

Per inciso, le righe in questione sono state quelle usate dallo strumento GOLF (Global Oscillations at Low Frequencies) a bordo della sonda SOHO qualche anno fa, al fine di misurare la velocità della fotosfera lungo la linea di vista per tutto il disco in modo da osservarne piccole oscillazioni, nonché essendo tali righe magneticamente attive, le variazioni della media globale del campo magnetico lungo la linea di vista con la precisione di 1 mGauss. GOLF ha tuttavia misurato la somma dei contributi delle due righe, essendo incapace di distinguere le due componenti.

Nell'immagine che segue le due righe del sodio riprese con lo spettrografo Solarscan: le righe all'interno del doppietto non appartengono al Sole (ad esclusione di quella del nickel, più marcata), ma all'atmosfera terrestre.

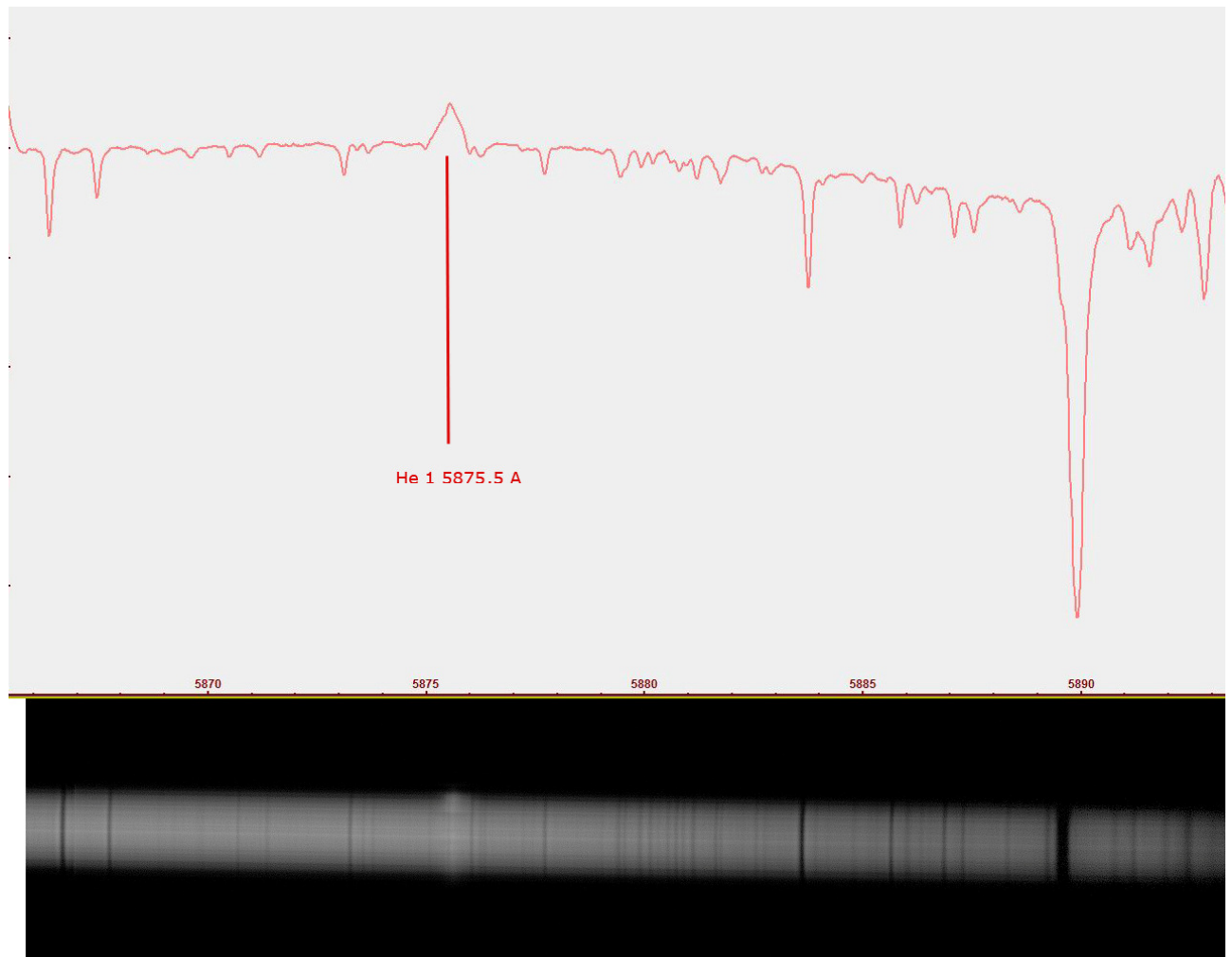


Qui di seguito una comparazione tra gli spettroeliogrammi in luce sodio NaI e Idrogeno Alfa, ovvero tra bassa ed alta cromosfera e tra due elementi molto diversi, un metallo alcalino ed un gas che è il primo elemento chimico della tavola periodica e l'elemento più diffuso nell'Universo osservabile.



La riga dell'Elio

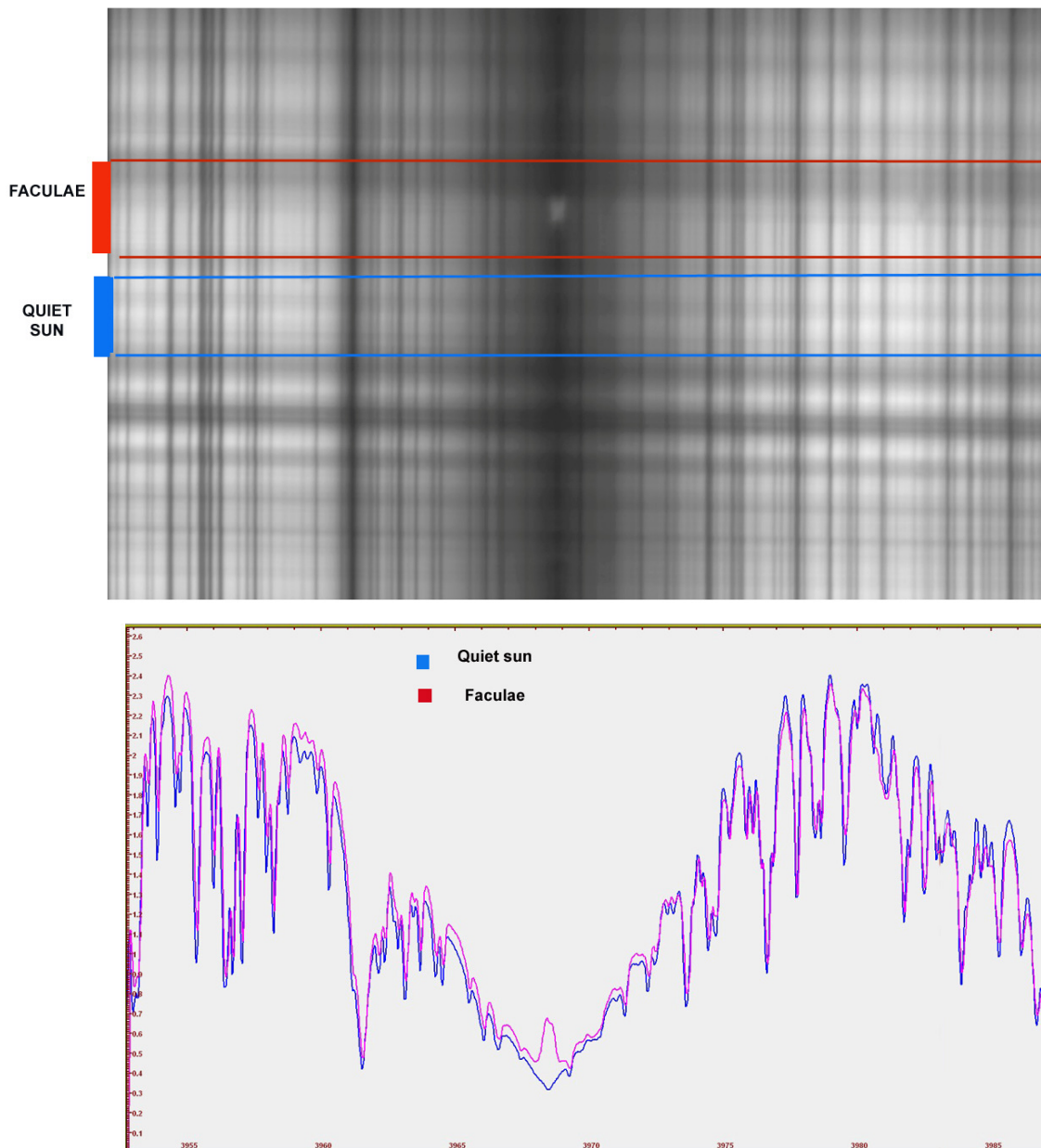
La riga dell'Elio a 5875 Å in assorbimento è piuttosto difficile da individuare per la sua elusività: molto più facile la riga in emissione, che si può riprendere ponendo la fenditura dello spettrografo sul bordo del disco solare.



Le righe del calcio ionizzato CaII K e H

Sono le famose righe del Calcio ionizzato a 3933.68 Å, e 3968.49 Å la cui caratteristica è la particolare sensibilità ai campi magnetici delle regioni attive e delle macchie solari, nella quali passano da assorbimento ad emissione, con le brillanti facole che osserviamo sul disco. Nell'esempio sottostante (elaborazione dell'autore) è visualizzato il passaggio della riga CaIIH da assorbimento ad emissione in prossimità di una regione attiva.

Appearance of Chromosphere in Ca2H light in quiet sun and faculae: note the spectral profile passing from absorption (blue) to emission (red).



La spettroelioscopia

La spettroelioscopia può essere definita come la capacità di osservazione del disco solare e delle sue caratteristiche nelle varie lunghezze d'onda degli elementi del suo spettro: nel caso di ripresa fotografica prende il nome di spettroeliografia. Nel seguito della trattazione si farà essenzialmente riferimento alla spettroeliografia, ovvero l'osservazione solare per tramite di un supporto fotografico, tradizionale o digitale .

Breve storia della Spettroeliografia

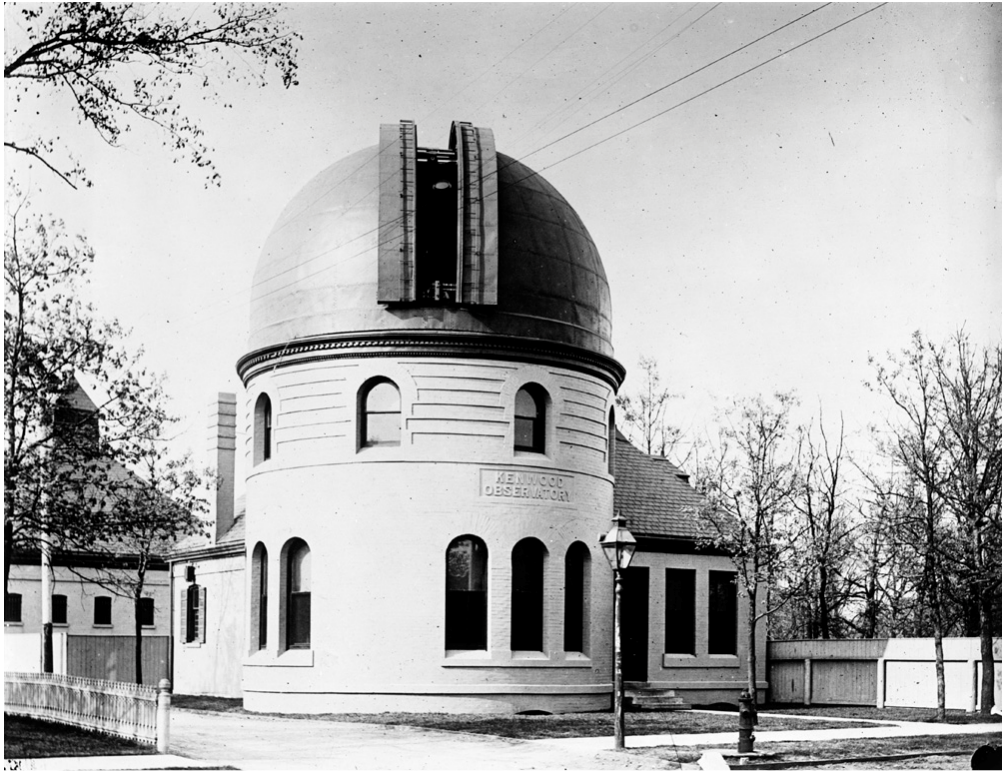
Lo spettroeliografo fu sviluppato da George Ellery Hale (Fig2- fonte Wikipedia) nel 1924, per l'osservazione e la ripresa fotografica del sole in varie lunghezze d'onda. Hale nacque a Chicago, USA, nel 1868, iniziò il suo percorso educativo già diciassettenne al M.I.T, e poi all'Osservatorio del College di Harvard. Nel 1890 divenne direttore del Kenwood Astrophysical Observatory. Lavorò ai più importanti Osservatori dell'epoca, quali quelli di Yerkes e di Mount Wilson.



Lo spettroeliografo fu, ad onor del vero, inventato indipendentemente da Hale e dal francese Henri Alexandre Deslandres, ma ad Hale va il merito di aver perfezionato l'invenzione sino a creare un potentissimo mezzo d'indagine della fisica solare. Lo sviluppo della lastre al collodio, unitamente all'invenzione ed alla diffusione dei reticoli di diffrazione di prima generazione del fisico Henry Rowland aprirono la strada alla registrazione delle immagini spettroeliografiche.

Il lavoro di Hale sugli spettroeliografi data sin dal 1889, epoca nella quale elaborò le sue prime idee sull'argomento, che saranno poi sviluppate molti anni dopo nell'articolo "The spectrohelioscope and its work" pubblicato sull'Astrophysical Journal del Dicembre 1929. Il primo prototipo dello strumento fu completato nel 1892 ed installato sul rifrattore Brashear da 12" nell'Osservatorio Kenwood di sua proprietà. Lo spettroscopio usava due ottiche da 1080 mm ciascuna come collimatore e lente di imaging, mentre il reticolo era a riflessione, da 100 mm e di 568 l/mm: le fenditure di ingresso e di uscita erano da 82 mm di lunghezza, per poter ricevere un'immagine solare di 50 mm di diametro.

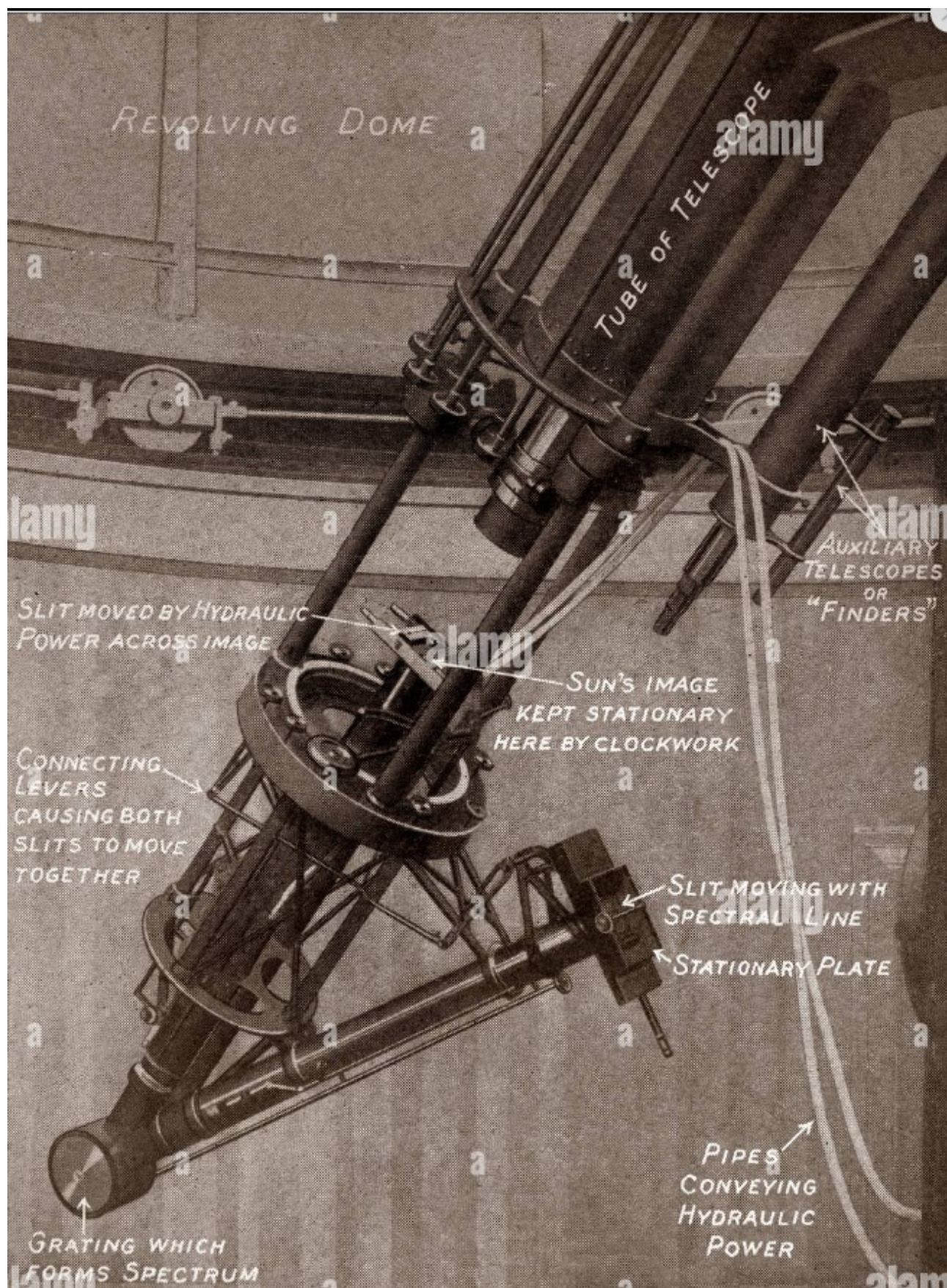
Deslandres, dal canto suo, installò lo spettroeliografo da lui inventato all'Osservatorio di Meudon, a Parigi, nel 1908.



Il Kenwood Observatory di G. Hale a Chicago (Fig3) (University of Chicago Photographic Archive, Special Collections Research Center, University of Chicago Library).

Lo spettroeliografo di Hale

Il Kenwood fu l'Osservatorio personale di Hale, costruito nel 1890 dal padre William Hale, presso il quale fu installato il rifrattore Brashear da 12" con lo spettroeliografo. Notare il layout dello strumento, in configurazione "classica" col complesso sistema di movimentazione delle fenditure. (foto Alamy- public domain).



Lo spettroeliografo di Hale al fuoco del rifrattore Brashear

Egli fu uno degli ideatori della torre solare di 60 piedi dell'osservatorio di Mount Wilson nel 1908, che fu poi un modello per quelle analoghe in tutto il mondo e contribuì alla progettazione del gigantesco, per l'epoca, telescopio da 5 metri di Monte Palomar che da lui prese il nome. Si interessò dell'attività magnetica del Sole ed in particolare di quella delle macchie solari e dell'effetto Zeeman. Scoprì l'inversione della polarità dei campi magnetici delle macchie al cambio del ciclo. Hale morì nel 1938 dopo una vita di intensa attività scientifica.

Spettroeliografi Professionali in servizio

Spettroeliografi professionali terrestri ancora in servizio in Europa sono: lo Spettroeliografo di Meudon a Parigi, quello dell' USET - Osservatorio reale del Belgio. La loro attività di monitoraggio spettroeliografico sul Sole è riportata al sito web BASS 2000 <https://bass2000.obspm.fr/home.php?PHPSESSID=f7b32e7ccd1002f04ca3bc9707bf0007> .

Esiste anche uno spettroeliografo all'Osservatorio geofisico dell'Università di Coimbra in Portogallo.

Lo spettroeliografo dell'Osservatorio di Meudon

L'Osservatorio di Meudon è stato un precursore, qui in Europa, della spettroeliografia professionale, iniziando l'attività sin dal 1908, con lo spettroeliografo di H. A. Deslandres, uno degli inventori dello strumento, insieme ad Hale. Il suo enorme archivio di spettroeliogrammi, prevalentemente delle righe H alpha e CaII K attraversa ben 10 cicli solari, 110 anni di storia dell'astronomia solare. Tale enorme quantità di immagini del sole attraverso gli anni ha contribuito ad approfondire la nostra conoscenza della dinamo solare e delle sue variazioni.

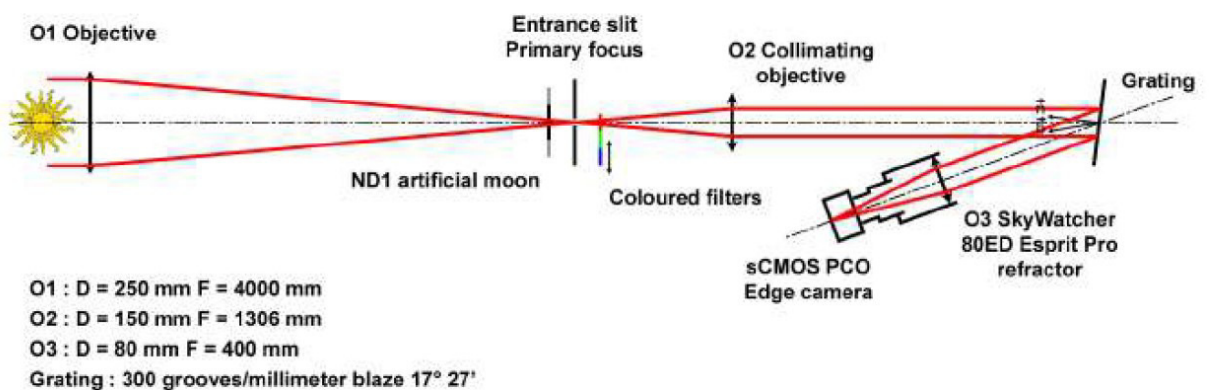
In tale ambito, lo spettroeliografo di Meudon è stato oggetto nel 2018 di un notevole rifacimento, allo scopo di migliorare le prestazioni del precedente strumento, aggiungendo anche alcune righe come la Ca II H.

Caratteristiche dello spettroeliografo di Meudon nella nuova versione del 2018.(fonte "The new 2018 version of Meudon Spectroheliograph" J.M Malherbe – K. Dalmasse)

Come nella precedente versione, la luce solare è indirizzata orizzontalmente da un celostata, due specchi piani da 400 mm. verso un doppietto da 250 mm ottimizzato per la parte rossa e violetta dello spettro: questo forma un'immagine di 37.2 mm sulla fenditura dello spettrografo. Un diaframma riduce la pupilla di entrata a 170 mm, fornendo una risoluzione teorica di 1" nella parte rossa dello spettro: tale risoluzione è tuttavia ridotta a 2" dalla turbolenza atmosferica locale. La fenditura ha un'apertura di 30 micron (1.5" sul sole). L'obiettivo di entrata è motorizzato con un movimento E/W, ed una scansione dura tipicamente 60 sec. Il movimento riduce la risoluzione da 1.5 a 2", ma tuttavia non c'è alcuna conseguenza sulla qualità delle immagini a causa del seeing. La lunghezza focale dell'obiettivo collimatore, un doppietto da 150 mm che è fisso,, è di 1300 mm. Il mezzo di dispersione è un reticolo da 300 l/mm con angolo di blaze 17°.27' .L'ordine di interferenza (3, 4, 5) è selezionato da un sistema di 3 filtri centrati su 400, 500 e 650 nm situati dietro il piano immagine. L'obiettivo della camera è dato da uno Skywatcher 80 ED di 400 mm di focale. La camera usata è una Fairchild 2020 con un sensore CMOS da 2048x2048 pixel quadrati da 6.5 micron, l'EQ è del 20%, 65% e 70 % rispettivamente nel CaII K, nell'H beta e nell'H alpha.

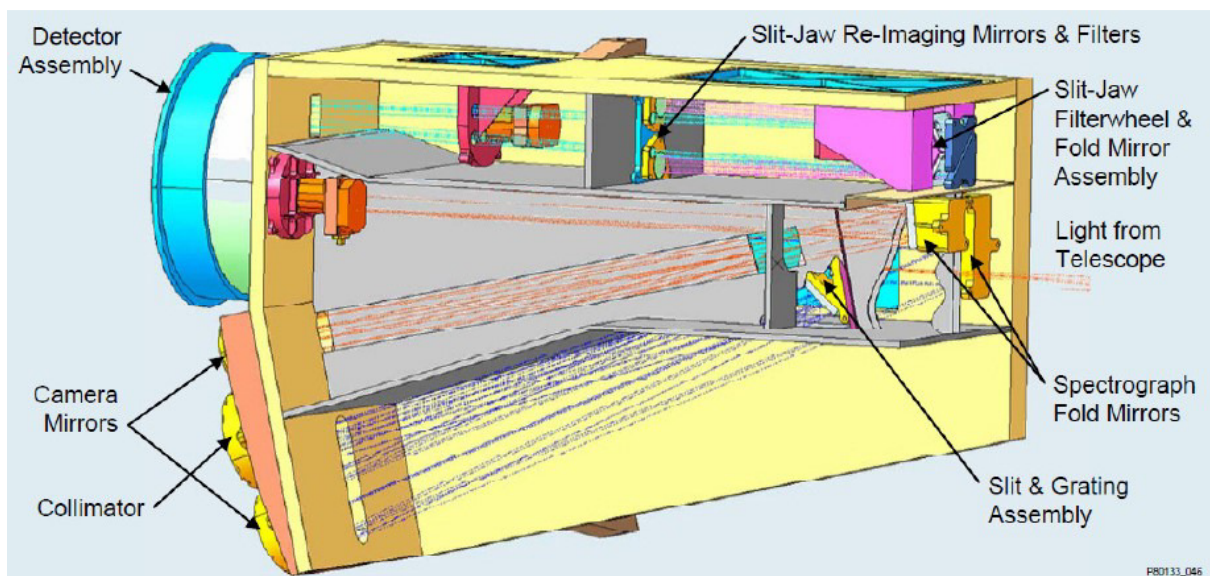
Le osservazioni effettuate con cadenza giornaliera sono dell'intero disco solare e delle protuberanze.

Schema dello spettroeliografo di Meudon



Spettroeliografi professionali satellitari

La strumentazione del satellite IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) è finalizzata ad osservare, ad una risoluzione mai vista prima, l'atmosfera solare al di sopra della fotosfera allo scopo di approfondire i meccanismi che provocano l'enorme aumento della temperatura tra fotosfera e corona. A tal fine IRIS osserva in particolare la cromosfera e la transizione alla corona per dare una risposta ai numerosi interrogativi sulla genesi delle gigantesche esplosioni solari come i flares ed i CME. Esso si avvale di un telescopio ultravioletto e di uno spettrografo-spettroeliografo ad altissima risoluzione, del quale si mostra il layout (fonte NASA/LMSAL) in grado di registrare sia immagini che spettri: Iris costituisce quindi lo stato dell'arte e l'espressione più moderna ed avanzata della spettroeliografia.

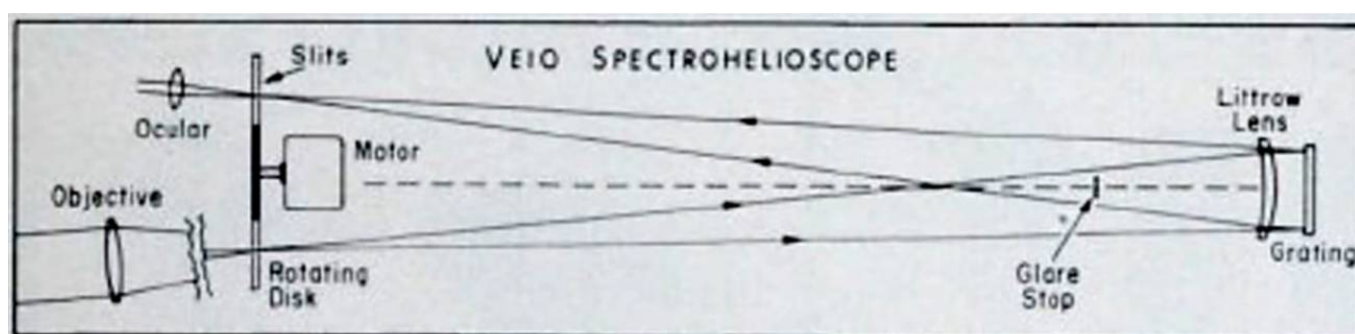


Spettroeliografi tradizionali amatoriali

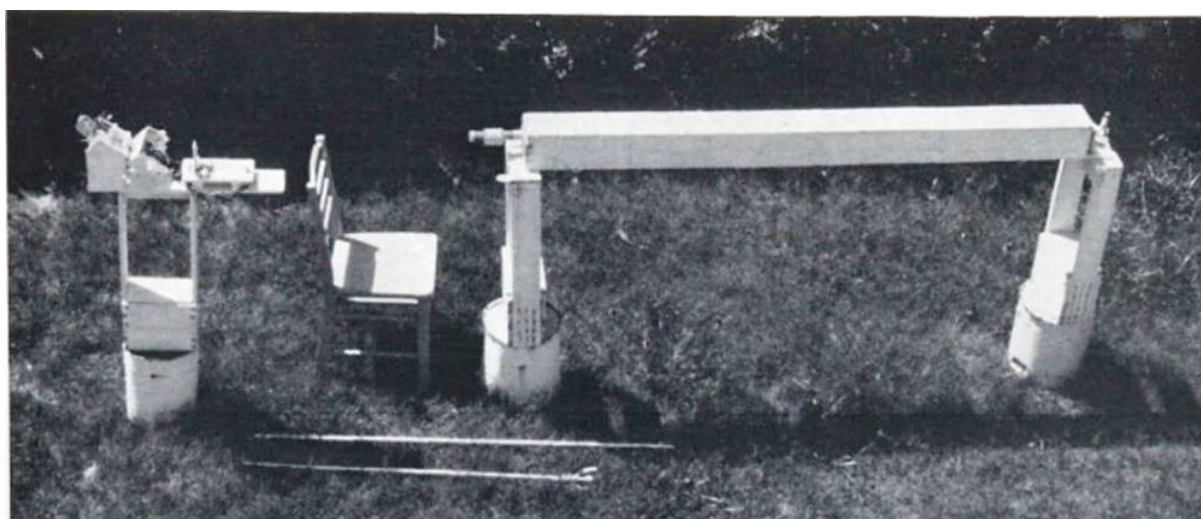
All'alba del mio interesse per la spettroscopia e la spettroeliografia fui attratto, e direi affascinato, dal poderoso lavoro portato avanti da Fredrick Veio, astronomo amatore californiano, nel settore della spettroeliografia amatoriale. Veio fu infatti il precursore di tale campo di ricerca tra gli amatori, con il suo famoso articolo sul numero di gennaio 1969 di *Sky and Telescope*, nel quale illustrava la costruzione ed il funzionamento di uno spettroelioscopio tradizionale di grande semplicità e medie dimensioni (all'epoca il digitale era al di là da venire) costruito nel 1964. Lo strumento si basava su due elementi a rifrazione, una lente fissa da 64 mm e 2700 mm di focale, alimentata da un celostato da 100 mm che inviava la luce solare ad uno spettroscopio Littrow con un menisco da 50 mm ed un reticolo da 32 mm per 1200 l/mm. I sintetizzatori erano due dischi di vetro da 108 mm con 24 fenditure radiali da 0.15 mm che fornivano una risoluzione di 12 arcsec sul disco solare. In uno spettroelioscopio tradizionale, come quello di Hale, per intenderci, l'elemento fondamentale era costituito dalle fenditure di entrata e di uscita ed ancor di più dai sintetizzatori di immagine in entrata ed in uscita che, ruotando ad una data velocità in modo sincrono, inviavano un'immagine solare scansionata alle fenditure e permettevano di osservare o fotografare una certa parte del disco solare nella lunghezza d'onda prescelta. I sintetizzatori più diffusi tra gli amatori erano quelli a prismi rotanti (cd "prismi di Anderson") che avevano tuttavia il difetto di essere costosi e difficili da sincronizzare, mentre per il suo primo progetto Veio scelse il sistema a dischi di vetro rotanti con fenditure radiali ideato da F. Stanley. Tale primo progetto di spettroelioscopio con elementi a rifrazione è anche quello mostrato a pag 4 del suo libro "The Spectrohelioscope" del 1999.

L'amico Fred Veio è venuto a mancare il 2 Ottobre del 2022, a 92 anni, ma "gone, but not forgotten" come dicono gli inglesi, la sua eredità pionieristica nel campo della spettroeliografia amatoriale rimane di enorme valore.

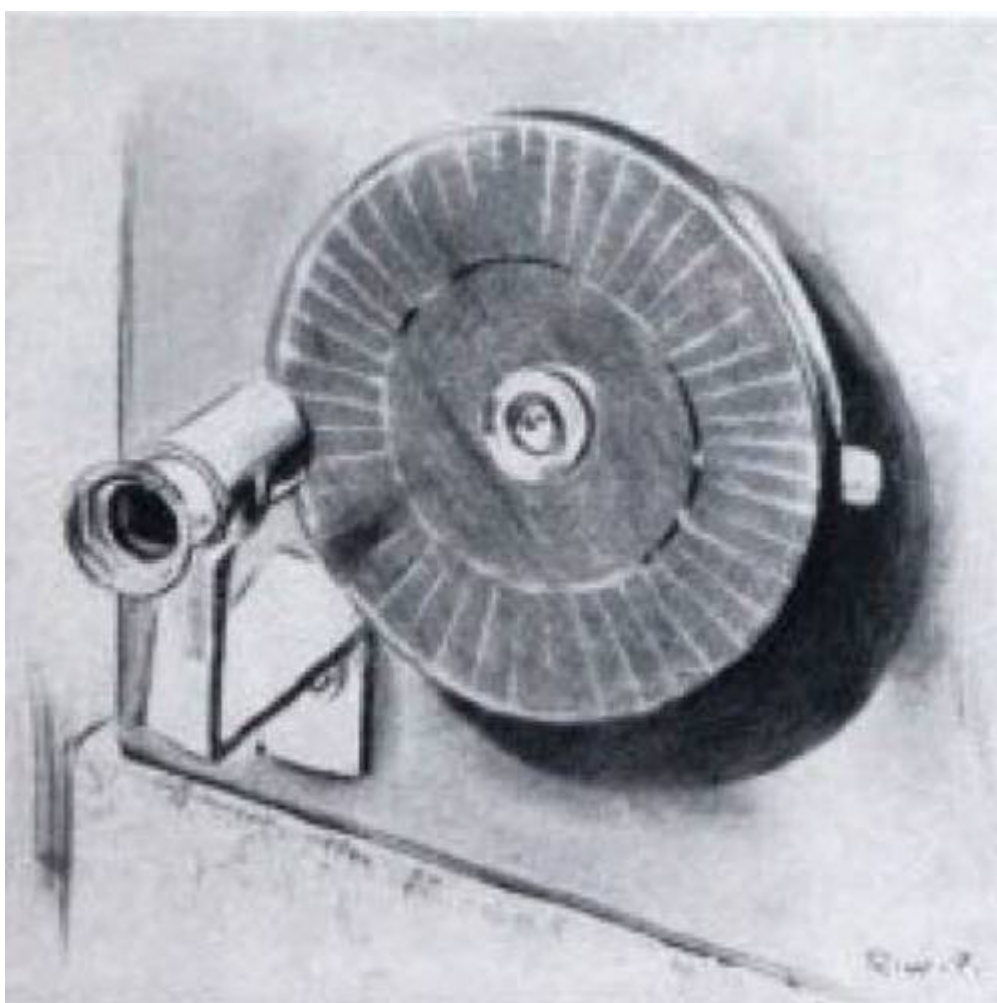
Le immagini che seguono illustrano il progetto e l'aspetto del suo primo spettroelioscopio di cui si è detto in precedenza.



Il Layout dello strumento (Fonte Sky and Telescope, gennaio 1969)



Lo spettroelioscopio/spettroeliografo di Veio



Il sistema di dischi a fenditure rotanti simile a quello scelto da Veio come sintetizzatore di immagine.

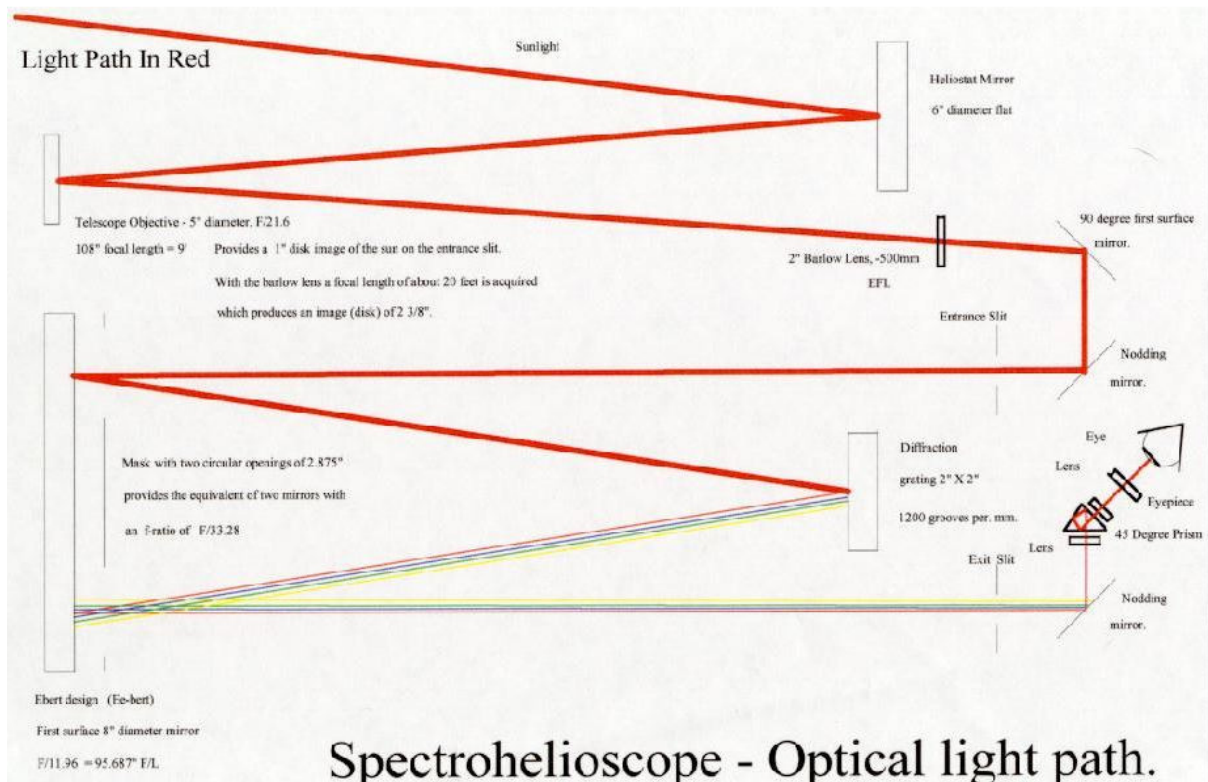
Veio è stato il precursore, ma altri autocostruttori, come Leonard Higgins, hanno seguito la sua strada.

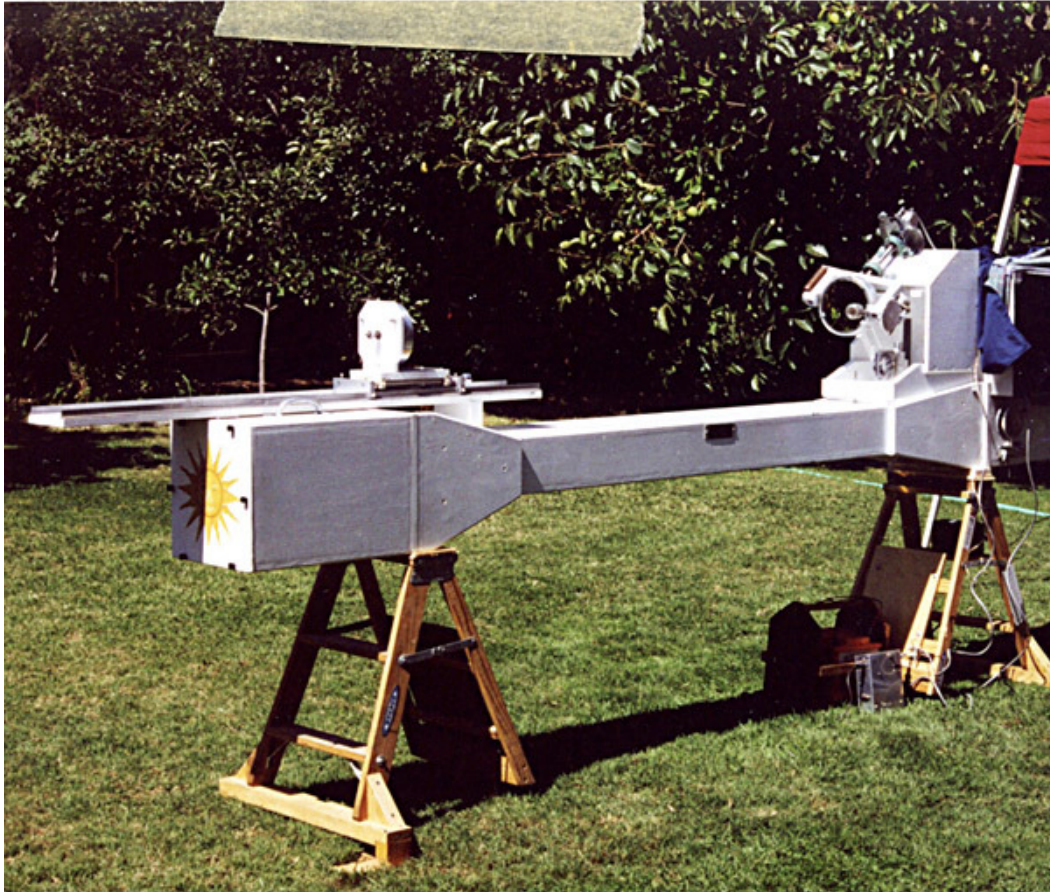
Qui di seguito è mostrato lo schema (l'ultimo di una serie di progetti) di uno spettroelioscopio/spettroeliografo amatoriale tradizionale del noto autocostruttore americano Leonard Higgins portato avanti con la guida e l'aiuto di Fredrick Veio nel 1998.

fonte: <http://spectroheliroscope.org/page2.htm>

Anche qui si tratta di un obiettivo rifrattore di lunga focale che alimenta uno spettroscopio in configurazione Ebert; l'uso di specchi oscillanti ad una data frequenza (nodding mirrors) prima delle fenditure d'ingresso e di uscita provvedono a sintetizzare un'intera immagine solare dalla riga di interesse, immagine che può essere osservata visualmente e fotograficamente.

Notare le cospicue dimensioni dello strumento, che è alimentato da un celostata. Fonte: <http://spectroheliroscope.org/page2.htm>





Lo spettroeliografo di L. Higgins

Come si osserva nell'esempio, i due componenti essenziali dello spettroelioscopio/spettroeliografo sono un telescopio ed uno spettroscopio. Il telescopio può essere di varie configurazioni ottiche, ma per l'osservazione solare sono obbligatorie configurazioni a lenti o tutto specchi. I catadiottrici non potrebbero operare a meno di non avere un filtro solare in ingresso, cosa che influirebbe negativamente sulle prestazioni dello strumento per la scarsità della luce in arrivo, considerando la ridottissima apertura delle fenditure.

La rivoluzione della Spettroeliografia Digitale

Lo sviluppo dell'informatica degli ultimi anni ha permesso, negli spettroeliografi amatoriali, di usare le videocamere digitali ed apposite procedure informatiche per ricostruire l'immagine dalle righe dello spettro: la videocamera registra l'immagine solare che scorre sulla fenditura con lo spettrografo puntato su una data riga ed il software provvede ad estrarre un'immagine del sole in quella riga. E' nata così la spettroeliografia digitale e tale campo di applicazione è ora alla portata di una platea molto più vasta di amatori per la maggiore (relativa) facilità di costruzione (o di acquisto) di spettroografi anche di modeste dimensioni. La digitalizzazione delle immagini spettroeliografiche ha quindi sostituito l'uso dei sintetizzatori, specchi oscillanti, dischi rotanti o prismi di Anderson posti dopo le fenditure, la cui realizzazione e messa a punto è particolarmente complessa, con semplici programmi informatici. Ovviamente con la digitalizzazione non è possibile l'osservazione visuale.

All'inizio la resa finale delle immagini degli spettroeliografi digitali era qualitativamente inferiore a quella degli spettroeliografi tradizionali, ma col progredire dello sviluppo dei sensori CCD e CMOS e la grande evoluzione dei programmi di costruzione delle immagini ora i particolari visibili sono oggi nettamente migliori, mentre il guadagno in dimensioni e peso e quindi capacità di utilizzo e portabilità è semplicemente enorme. Basta del resto fare il confronto tra lo strumento amatoriale classico sopra illustrato (ca 3 metri di lunghezza) ed il mio VHIRSS, di 8.6 Kg di peso e 110 cm di lunghezza, trasportabile ovunque con la massima facilità. E' bene premettere ed evidenziare che strumenti specifici del genere non esistono nel mercato consumer, a parte un progetto a media risoluzione da stampare in 3D, Sol Ex, da corredare con un kit ottico prodotto dalla nota ditta francese di strumenti per la spettroscopia Shelyak : <http://www.astrosurf.com/solex/sol-ex-presentation-en.html> Tuttavia per strumenti dedicati a tale attività in alta dispersione e risoluzione spettrale ($R > 30000/40000$) con prestazioni elevate, la strada dell'autocostruzione è al momento l'unica percorribile. I risultati,

in termini di particolari visibili sul sole, superano quelli dei filtri solari commerciali e sono simili a quelli degli osservatori professionali.

Componenti di uno spettroeliografo digitale

I componenti fondamentali di uno spettroeliografo digitale sono:

- 1 - Il telescopio che proietta l'immagine solare sulla fenditura;
- 2 - La fenditura;
- 3 - Lo spettroscopio, nelle varie configurazioni possibili;
- 4 - Una camera- videocamera CCD o CMOS con un sensore di adeguate dimensioni e risoluzione.

Vedremo ora in dettaglio le caratteristiche di tali componenti.

Il telescopio

Il telescopio svolge il compito di inviare l'immagine solare alla fenditura, ovvero effettua lo stesso lavoro del telescopio solare che invia l'immagine solare su un filtro H α o CaII a banda stretta, come quelli che hanno avuto e continuano ad avere tanta diffusione tra gli astrofili. Immaginiamo quindi che al posto di un filtro ci sia la fenditura e lo spettroscopio, con la grande differenza che mentre il filtro seleziona una sola riga, H α , CaII od altro, lo spettroscopio può teoricamente selezionare una quantità notevolissima di righe, e quindi equivalere ad una quantità altrettanto notevole di filtri, pur essendo un unico strumento, con una banda passante molto più stretta dei filtri tradizionali in commercio.

La prima scelta da fare è sulla configurazione ottica, e precisamente tra strumenti a specchio, strumenti a lente e strumenti compositi (catadiottrici).

I catadiottrici andrebbero a mio avviso esclusi per l'ovvio motivo che, data la corta focale (f2-f3) dello specchio primario il calore solare sarebbe deleterio per il supporto del secondario ed il suo

paraluce, nonché per il paraluce del primario stesso, rilasciando inoltre all'interno del tubo chiuso una quantità tale di calore da rendere impossibili o poco efficienti le osservazioni per effetto della turbolenza. Naturalmente tale problema potrebbe essere bypassato usando un filtro di rigetto di dimensioni e banda passante adeguate, ovvero un IR-UV cut davanti alla lastra, ma entrambe le soluzioni sarebbero molto costose (ca 1500 € per aperture da 20 cm) e poco soddisfacenti dal punto di vista della versatilità in quanto costringerebbero ad usare solo alcune righe nel caso dell'ERF, ed escludendone invece alcune nel caso di filtri IR-UV cut che normalmente hanno un range spettrale di 4000-7000 Å. Un astrofilo canadese ha ottenuto buoni risultati con un catadiottrico MTO Rubinar da 10 cm, anteponevovi un filtro UV IR cut di tale formato e di ampia band pass, che comunque lasciava passare la banda CaIIK e H (i normali filtri UV-Ir cut Baader Planetarium normalmente la escludono). Inutile dire che tale soluzione potrebbe essere appagante solo nel caso si possedesse già un tale filtro, che altrimenti, ordinato ad hoc con specifiche caratteristiche e per aperture notevoli (10-11 cm) costerebbe cifre elevate, dell'ordine di oltre 2-300 €.

Telescopi a specchio

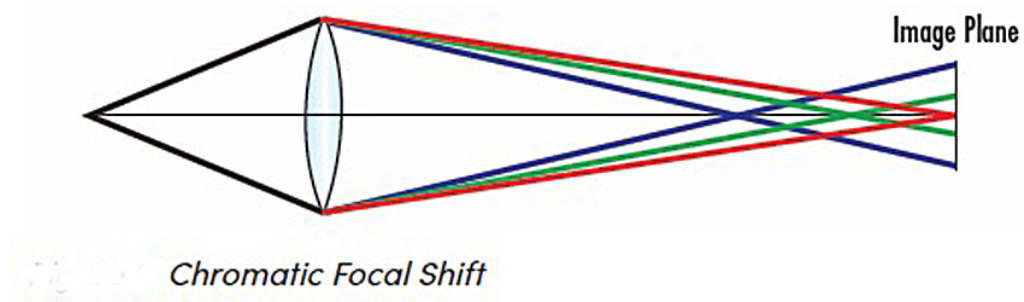
Newton

Il newton sarebbe in linea di principio lo strumento ideale come ottica per alimentare uno SHG digitale, non fosse altro per la sua totale acromaticità. Tuttavia, la configurazione "piegata" del fascio ottico, nonché la vicinanza del punto di fuoco al tubo tendono a complicare in modo notevole il progetto dello strumento, rendendo, tra l'altro, necessario un elemento estrattore di fuoco (una telecentrica) per portarlo sulla fenditura. L'astrofilo francese Phil Rousselle ha realizzato qualche tempo fa uno spettroeliografo che utilizzava come telescopio un tubo ottico Newton 114/900: ma il montaggio è complicato e non alla portata di tutti.

Telescopi a lenti: i rifrattori

a) Rifrattori Acromatici

I rifrattori acromatici costituiscono a prima vista i telescopi ideali per svolgere il compito di telescopio di un SHG (acronimo di Spectro Helio Graph): basso costo; possibilità di impiegare un vasto range di focali e di diametri; inoltre, se ben realizzati e privi di sferocromatismo, l'aberrazione cromatica sarebbe in ogni caso bypassata dal fatto che essi produrrebbero immagini in luce monocromatica. Tuttavia, essi presentano un grosso inconveniente per i nostri scopi: le consistenti variazioni del punto di fuoco al variare della lunghezza d'onda, specie se si usano telescopi di diametro medio 90/100 mm a basso rapporto F/D, ovvero a corta focale (l'uso di rifrattori a lungo fuoco non è possibile per limiti dimensionali e di peso) Ciò vuol dire che se, ad esempio, ho messo a fuoco l'SHG sulla riga H α e voglio andare sulla riga CaII K dovrò rifocheggiare non solo il telescopio, ma anche lo spettroscopio, dato che i rispettivi fuochi si intersecano. Non è, sia ben chiaro, una tragedia, ma è tuttavia un fastidio. Nell'immagine che segue lo shift cromatico di un obiettivo acromatico fonte (Edmund Optics-Gregory Hollows nad others – Wavelength effects on Performance)



La buona notizia è, come si è accennato, che l'illuminazione monocromatica elimina sia lo shift cromatico che l'aberrazione cromatica laterale, producendo immagini ben corrette, a patto che sia tale anche l'aberrazione sferica. Ora, il limite di diffrazione, che ben conosciamo negli strumenti astronomici, è dato dal più piccolo punto teorico creato da una lente perfetta come definito dal cd. "disco di Airy", le cui dimensioni dipendono tuttavia dalla lunghezza d'onda (e ciò vale per qualsiasi tipo di telescopio), come si può osservare nella seguente tabella (sempre fonte Edmund Optics):

Color	Wavelength (nm)	Aperture (f/#)				
		f/1.4	f/2.8	f/4	f/8	f/16
NIR (Near-Infrared)	880	3.01	6.01	8.59	17.18	34.36
Red	660	2.25	4.51	6.44	12.88	25.77
Green	520	1.78	3.55	5.08	10.15	20.30
Blue	470	1.61	3.21	4.59	9.17	18.35
Violet	405	1.38	2.77	3.95	7.91	15.81

Theoretical Airy Disk Diameter Spot Size (in μm) for various Wavelengths and f/#s

Ora, quali sono le conseguenze dell'uso di rifrattori acromatici come telescopi? Dalla tabella precedente risulta che, a parità di diametro e rapporto F/D, andando verso il violetto il disco di Airy diviene sempre più piccolo e la risoluzione ed il contrasto aumentano. In più, i buoni rifrattori acro sono corretti per la riga C dell'Idrogeno, la riga H alpha. D'altro canto, il loro input sulla fenditura, sull'ottica e sul reticolo dello spettrografo produrrebbe luce monocromatica in uscita sulla camera. Quindi, anche senza l'uso di filtri davanti all'obiettivo o nel cammino ottico, che comunque enfatizzano il contrasto, i rifrattori acro sono in condizione di inviare buone immagini solari alla fenditura sia per le righe nel rosso profondo (H alpha), che in quelle nel violetto (CaII K e H), sempre, sia ben chiaro, in assenza di aberrazione sferica da cromatismo.

b) Rifrattori apocromatici

Sono gli strumenti che attualmente vanno per la maggiore e che presentano un livello di offerta veramente notevole, con prezzi diversificati e comunque accettabili. Le focali spaziano da 300 a 1200 mm in un range di tipologia costruttiva che si limita a quattro tipi fondamentali: triplette spaziate in aria, triplette spaziate in olio, doppietti alla fluorite, doppietti ED.

Rispetto agli acromatici, i rifrattori apo non presentano una significativa aberrazione cromatica, salvo un lieve residuo in alcuni esemplari a doppietto ED. Il punto forte è un ottimo controllo dell'aberrazione sferica, con immagini che restano nitide anche ad ingrandimenti elevati.

Tra questi, a mio avviso, la scelta di rifrattori con doppietti con lenti ED a bassa dispersione tipo OHara FPL 53 si presenta la migliore e quella con più elevato rapporto qualità/prezzo. Rifrattori del genere sono da anni sul mercato e quindi si possono trovare anche nell'usato a prezzi molto convenienti.

I vincoli del Telescopio:

-Esso deve dare, nel caso si voglia riprendere l'intero disco solare, un'immagine del sole di diametro inferiore all'apertura della fenditura, pari mediamente a circa $1/100$ della lunghezza focale, come si vedrà in seguito.

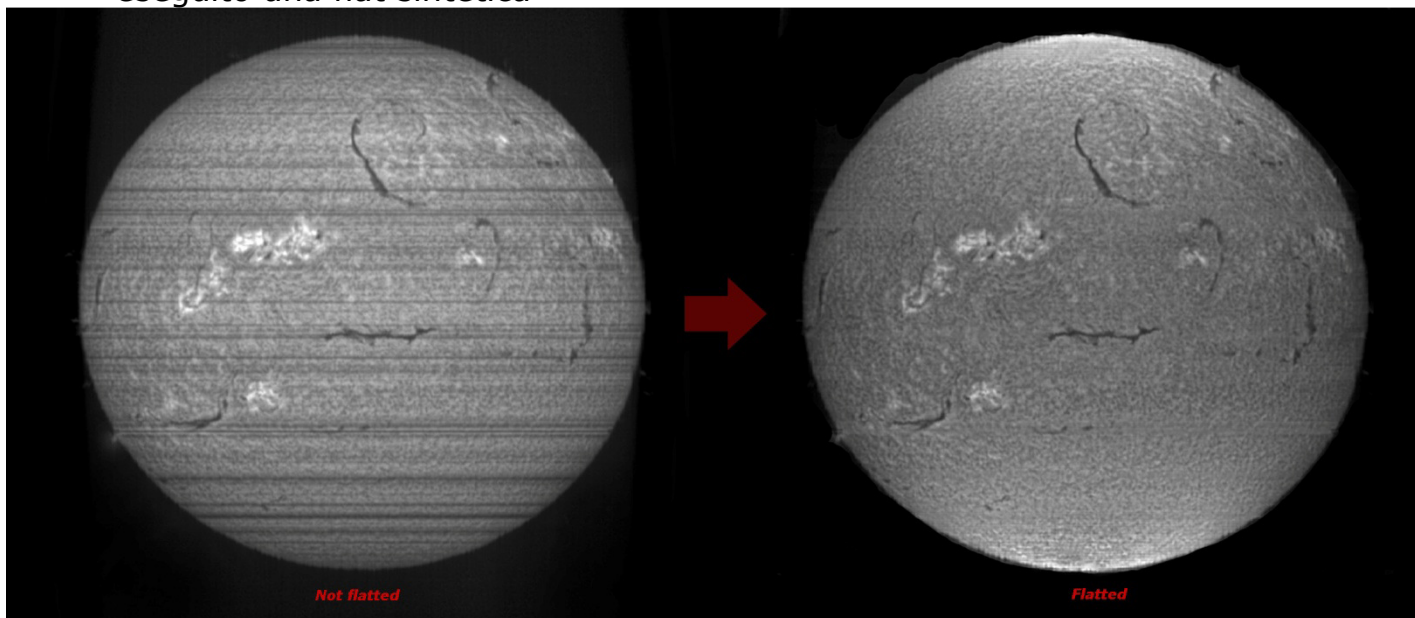
-Deve avere un potere risolutivo sufficiente a mostrare le piccole strutture solari in luce H α e Ca II K e H. Un potere risolutivo strumentale tra 1 e 2 arcsec è sufficiente, anche tenendo conto che esso è limitato dal seeing diurno che difficilmente permette di superare i 2 arcsec. Un buon diametro strumentale si aggira sui 100 mm, che fornisce un potere risolutivo teorico di 1.2 arcsec. Considerato che il Sole sottende mediamente 1920 arcsec, e che una focale di 1000 mm darebbe un'immagine solare di 9.3 mm sulla fenditura, su questa si avrebbe una scala immagine di 206 arcsec/mm, ovvero 0.2" per μ . Un obiettivo di 100 mm di apertura tra f 8 e 10 sarebbe quindi un'opzione interessante, pur considerando le dimensioni e l'ingombro che apporterebbe allo SHG. Questo tuttavia non è un vincolo assoluto: nel caso di ripresa dell'intero disco vanno bene anche rifrattori da 60-70 mm di focale.

-Non deve essere uno strumento con un gruppo di lenti posteriore, potenzialmente atto a deteriorarsi o rompersi per effetto dello stress termico.

La fenditura

Tale componente che costituisce, nelle sue versioni riflettenti, a lamina e quant'altro, il cuore di uno spettroscopio stellare, a maggior ragione costituisce l'elemento fondamentale di uno spettroeliografo, data la sua diretta influenza sulla qualità delle immagini spettroeliografiche, come e forse più del reticolo.

La chiusura della fenditura ha un effetto diretto sulla risoluzione spettrale e quindi sulla qualità delle immagini di un SHG, ma la possibilità di chiudere una fenditura regolabile al massimo possibile (10-15 micron, ad es.) è funzione diretta della qualità di lavorazione meccanica della struttura e delle lamine della stessa. Per far comprendere quello che intendo, vale il confronto contenuto nella figura che segue, tra un'immagine spettroeliografica H alpha raw ottenuta con uno dei miei SHG con una fenditura dai bordi molto chiusi, ma non lavorati a tolleranze ottiche, e la stessa immagine dopo aver eseguito una flat sintetica

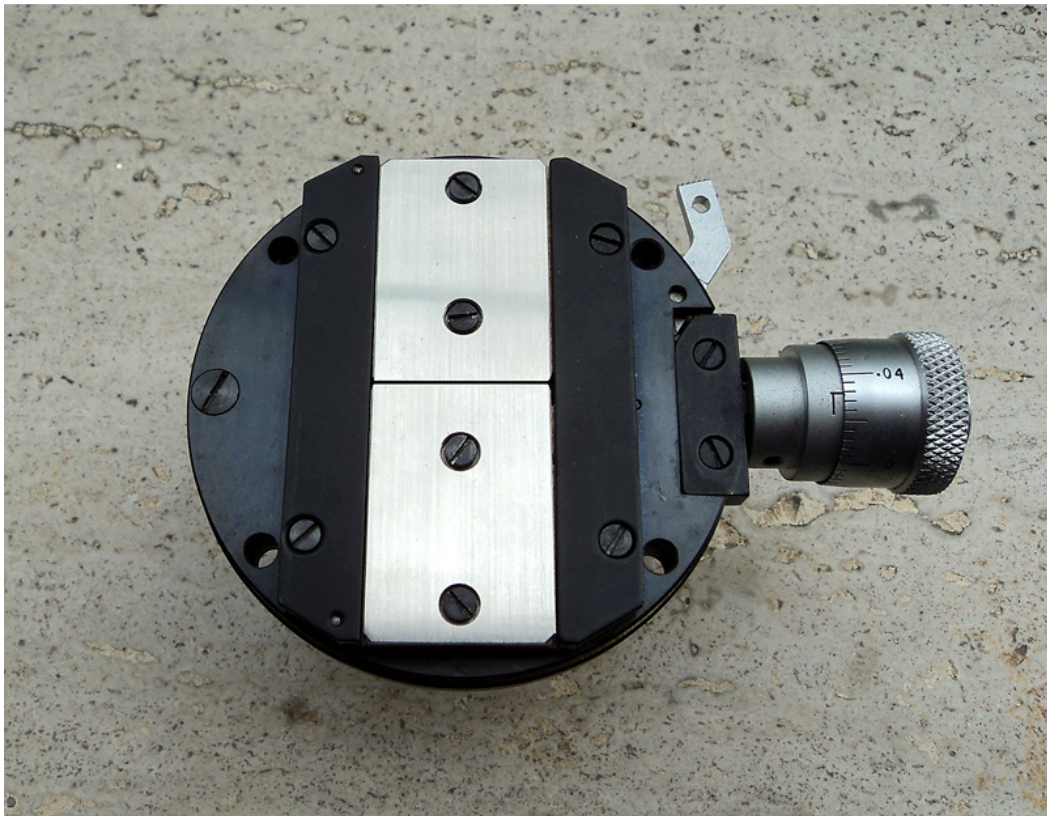


Come si vede, le righe orizzontali (transversalium) provocate da piccole imperfezioni dei bordi delle lamine, si riflette in modo impietoso sulla qualità dell'immagine finale. Ma allora, *basta lavorare al meglio le lamine*, sento già la risposta il lettore sulla questione, risposta esatta, ma con un particolare: la lavorazione delle lamine a tolleranze ottiche ($1/4$ lambda), coinvolgendo processi sofisticati e complessi, verrebbe a costare più dello stesso spettroscopio. Vero è, come vedremo, che l'eliminazione del transversalium può, entro certi limiti, avvenire ora anche via software, ma una fenditura ben lavorata e funzionante è sempre garanzia di ottime immagini, quindi è giocoforza ricorrere a possibilità diverse che possono così sintetizzarsi:

1-Procedere all'acquisto di fenditure professionali di surplus su alcuni negozi on line.

Un rivenditore americano,BMI surplus, ha una vasta offerta di componenti ottici e meccanici per spettroscopia, fenditure comprese: i prezzi sono vari ed occorre saper scegliere: <https://bmisurplus.com/>

Nell' immagine che segue una fenditura professionale regolabile con micrometro da me acquistata per 100 € dal predetto rivenditore:la fenditura, meccanicamente pregevole, è stata poi perfezionata smontando e rifinendo i bordi della lame ed aggiungendo un adattatore femmina 42 x 0.75.Il sistema meccanico micrometrico di chiusura agisce in modo uniforme, in modo da non spostare il parallelismo delle lame a chiusure molto strette.La mancanza di parallelismo si riflette infatti sull'immagine finale,dividendola in due zone: una chiara ed un'altra più scura.



Sul mercato del nuovo, per intenderci, una tale fenditura verrebbe a costare cifre oscillanti tra i 500 ed i 1000 €, quanto un piccolo rifrattore apo, e ciò deve farci riflettere sull'importanza di tale componente, di portata pari a quella della qualità dell'ottica del telescopio con il quale effettuiamo le nostre osservazioni serali.

Un altro noto rivenditore d'oltreoceano, Surplushed, offre a prezzi veramente esigui (24 \$) delle fenditure regolabili realizzate in India di 10 mm di lunghezza (ca 8 utili) che, pur non essendo il top dal punto di vista della meccanica, sono accettabili e suscettibili di perfezionamenti.

<https://www.surplushed.com/pages/item/m1570D.html>



Fig 10

Per migliorare la qualità delle lame metalliche delle fenditure a basso costo di SurpluShed io normalmente opero nel modo seguente:

- a) smonto le lamine in ottone dalla montatura;
- b) le esamino al microscopio a circa 400-500 x per osservare il livello di precisione (o imprecisione) delle stesse;
- c) Appoggio le lame su una superficie di plastica dura (ideale il policarbonato) interponendo tra questa e la lama un sottile strato di pasta abrasiva per carrozzieri, (ma può essere anche usato l'ossido di cerio), e strofino il bordo della lama sul supporto con movimenti longitudinali con pressione uniforme per qualche minuto, quindi ripeto l'osservazione al microscopio per verificare il grado di miglioramento e, nel caso proseguo l'operazione sino ad ottenere un risultato soddisfacente.

Tale procedura sembra funzionare e riesce a migliorare sufficientemente i bordi delle lame.

Un'altra questione è se usare fenditure ad apertura fissa o regolabile; essa può così sintetizzarsi:

La fenditura regolabile sarebbe preferibile in quanto ha la possibilità di variare col variare dell'intensità luminosa del fascio ottico in ingresso, dovuto a eventuali diaframature o inserimento di filtri davanti al telescopio, allo stato del cielo, etc, tuttavia essa presuppone un sistema meccanico sofisticato che in teoria dovrebbe garantire la chiusura simultanea di entrambe le lame mantenendo il loro parallelismo in fase di chiusura. Una tale meccanica è ovviamente costosa e per strumenti non professionali forse anche non necessaria. Le fenditure regolabili di surplus, specie se modificate nel senso d'anzi specificato, possono svolgere in modo adeguato il loro compito, anche perché si trovano facilmente di lunghezza superiore od uguale ai 10 mm, sufficiente per accogliere le immagini dell'intero disco solare anche per focali del telescopio non molto ridotte e con sensori CCD di dimensioni adeguate; inoltre le lame, in ottone od in acciaio, hanno uno spessore sufficiente per garantire la loro resistenza allo stress termico che, per un telescopio da 100 mm senza alcun filtro di rigetto può giungere a 7.85 W.

Le fenditure fisse, spesso ottenute al laser e non per lavorazione meccanica, sono quelle più facilmente reperibili, anche a se a prezzi non proprio popolari, presso i grandi rivenditori di materiale ottico come Edmund Optics e Thorlabs. Esse presentano tuttavia l'inconveniente di avere una lunghezza standard di 3 mm ed un supporto metallico molto sottile, che, se non adeguatamente protetto, potrebbe tendere alla deformazione sotto stress termico. Per contro, i loro bordi, ottenuti al laser, presentano un notevole livello di precisione a chiusure molto strette, anche se, occorre dirlo, questa varia da esemplare ad esemplare. Esse sono disponibili sino ad un minimo di 5 micron di apertura. Ultimamente sono disponibili anche fenditure da 10 mm di lunghezza, ma di apertura di 20 micron, piuttosto elevata per un SHG.

Fenditure ottenute su un sottilissimo strato di cromo su supporto di quarzo da 9 micron di apertura e 12 mm di lunghezza, inserite in un

quadrato di rame per dissipare il calore, sono state recentemente realizzate da un astrofilo inglese, Douglas Smith, ed una di queste equipaggia attualmente il mio spettroeliografo dedicato all'UV POSS2, con ottimi risultati .

Le caratteristiche della predetta fenditura sono descritte dal costruttore come segue (testo inglese tradotto in italiano):

Dimensioni dei chip di quarzo: 15 mm x 15 mm x 2.30 mm

Apertura della fenditura: 9 micron +/- 0.4

Lunghezza della fenditura: 12 mm

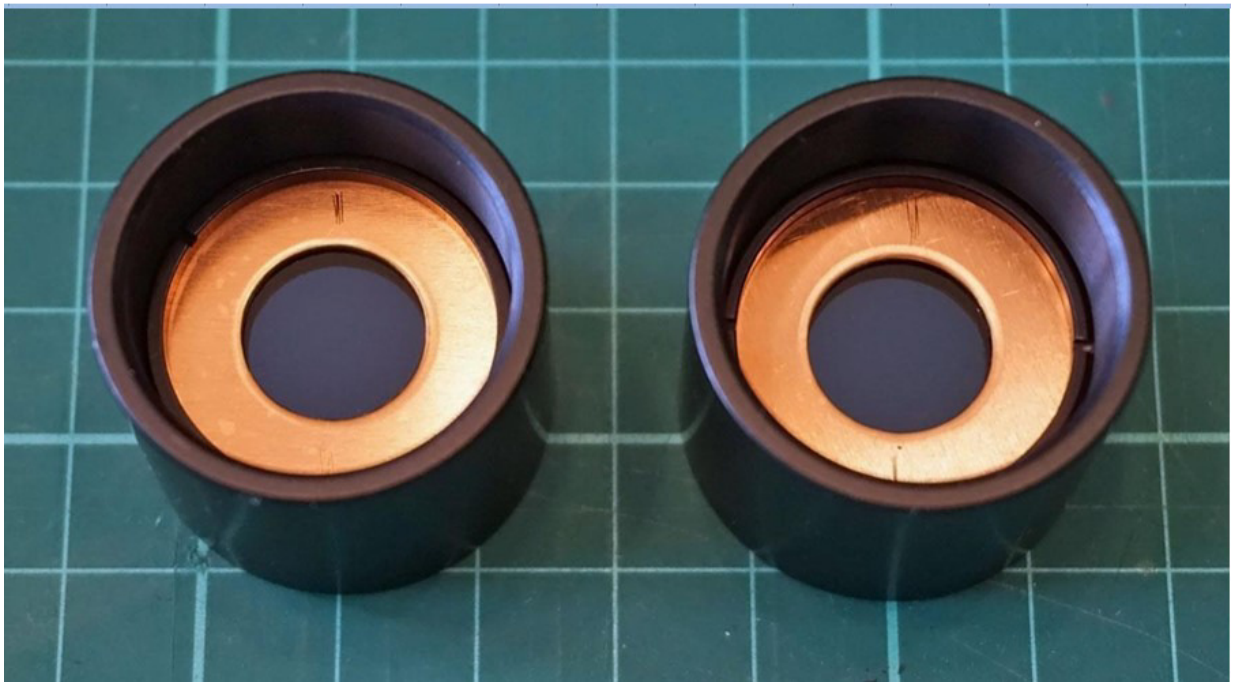
Dimensioni del disco di rame: 25.2 mm OD, 12.8 mm ID, spessore 0.9 mm

Il costruttore afferma che, siccome il quarzo fuso possiede un coefficiente di espansione termica molto inferiore a quello del vetro , è estremamente improbabile una sua rottura dovuta al calore. Persino con un rifrattore da 140 mm di apertura e 800 mm di focale, il substrato di quarzo non si è mai rotto se esposto alla luce solare a fuoco su di esso senza alcuna attenuazione.

Tuttavia, la sottilissima maschera di cromo può essere danneggiata da lunghe esposizioni alla luce solare focalizzata su di essa. Pertanto, è altamente raccomandato di porre un filtro UV IR cut da 2 pollici a 15-20 cm di distanza dalla fenditura.

Il filtro Astronomik L1 è probabilmente quello ottimale per osservare anche le righe spettrali intorno ai 400 nm, come le CaII K e H. Se invece l'H alpha costituisce l'interesse principale, allora si potrà usare un qualsiasi UV-IR cut di buona qualità.

La fenditura è composta da un segmento quadrato di 15 mm di quarzo montato su un disco di rame da 1 pollice forato al centro come si osserva nelle immagini.



Altre fenditure su supporto di vetro riflettente da 10 micron di apertura e 4.5 mm di lunghezza sono commercializzate dalla ditta francese di strumenti per la spettroscopia Shelyak. <https://www.shelyak.com/produit/se0223a-fente-alpy-uvex-10-%c2%b5m/?lang=en> a partire da 122 €. Anche per queste, tuttavia, è opportuno, a mio avviso, guardarsi dal calore solare concentrato con opportuni filtri ND e IR-UV cut.

2-Procedere alla progettazione ed all'autocostruzione in proprio, cosa che mi sento di sconsigliare, in quanto la complessità dell'impresa ed il costo non garantisce risultati migliori di quelli delle possibilità già esaminate, a meno di non disporre di un'officina meccanica di precisione e della capacità di usarla.

Ho accennato all'importanza della lunghezza della fenditura, che va necessariamente rapportata alla focale del telescopio che proietta l'immagine solare su di essa ed al diametro dell'immagine del disco solare proiettata. Una fenditura di 3 mm a fronte di un'immagine del Sole di 6 mm ci darebbe, a parità di altre condizioni, la possibilità di coprire solo metà del disco nell'immagine spettroeliografica finale.

Il Sole copre mediamente circa 32 minuti d'arco (1920 arcsec) ad 1 U.A, ma, dato che la sua distanza dalla terra varia seguendo la sua orbita nel corso dell'anno, il suo diametro apparente sarà di 32.5' a gennaio e 31.5' a luglio. Il diametro del disco proiettato sulla fenditura sarà quindi, in radianti, pari a:

$D = FL \times 0.00948$ in gennaio

$D = FL \times 0.00917$ in luglio

Dove D è il diametro del disco, FL la lunghezza focale del telescopio, con tutte le grandezze espresse in mm.

Per una focale di 1000 mm D sarà quindi uguale a 9.48 mm a gennaio e 9.17 a luglio (mediamente 9.325), che richiede una fenditura da 10 mm di lunghezza. Per una focale di 500 mm il diametro del disco sarebbe in media di 4.7 mm e basterebbe invece una lunghezza della fenditura di 5 mm.

L'apertura della fenditura

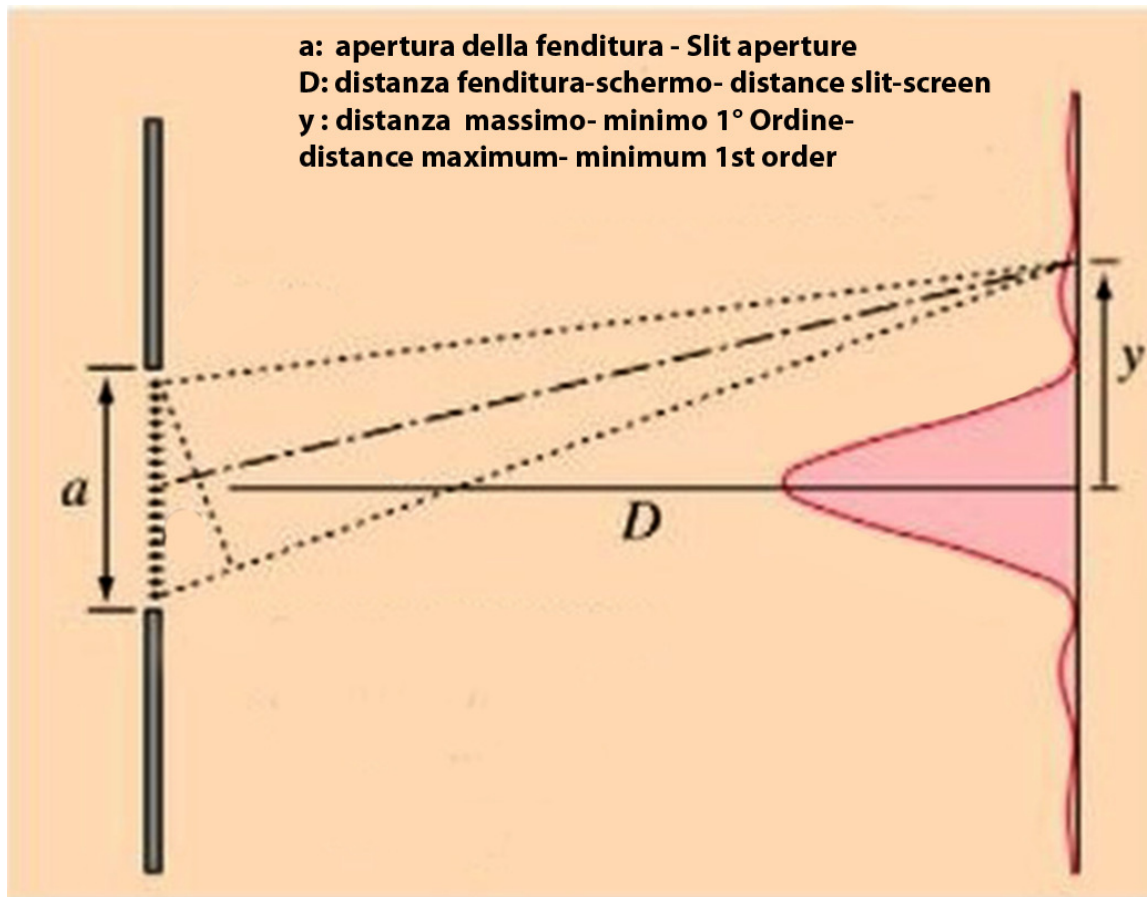
Quanto all'apertura della fenditura, sulla base di quanto detto in precedenza, una focale di 1000 mm fornirebbe mediamente una scala immagine di $(1920/9.325)$, 205 arcsec x mm, ovvero 0.2 arcsec x μm , il che vuol dire che un'apertura della fenditura di 10 micron fornirebbe una risoluzione spaziale di 2", sufficiente per registrare i particolari sul Sole. Occorre tuttavia tenere anche conto delle dimensioni dei pixel della camera: per pixel di circa 10 μm sarebbe tutto ok, ma in caso, diciamo, di pixel da 4.65 o 5 μm il campionamento sarebbe di 2" x 2 pixel all'incirca, la metà di quella del campionamento ottimale.

Una focale di 500 mm fornirebbe una scala immagine $(1920/4.665)$ di 411 arcsec/mm, o 0.4 arcsec x μm ovvero una risoluzione di 4" x 10 micron. Per il principio di Nyquist occorre campionare 4" per 2 pixel, e, nell'ipotesi di pixel da 4.65 o 5 micron, tale principio sarebbe soddisfatto.

Quindi un'apertura di 10 μm della fenditura ed una focale di 500 mm si accoppierebbero abbastanza bene con una camera con pixel ad 4.4-4.65 μm come le DMK 51, ma anche con camere come la ZWO ASI 174. Nel caso di altre camere CMOS, come le ZWO ASI 183, con pixel da 2.5 μm sarebbe opportuno utilizzarle in binning 2. Naturalmente c'è il rovescio della medaglia, e chiusure di 10 μm con una fenditura regolabile non professionale sono possibili, ma spesso imperfette al punto da far preferire 15 micron circa, ovvero il ricorso a fenditure fisse da 9-10 micron.

La misurazione dell'apertura della fenditura

Nelle fenditure commerciali regolabili non dotate di micrometro od altri strumenti di misurazione si potrebbe porre il problema di misurare l'ampiezza di una data apertura della fenditura. Questa può essere ottenuta, con il classico esperimento sulla diffrazione, usando un puntatore laser ed indirizzandone il fascio attraverso la fenditura su di uno schermo posto alla distanza D .



La formula per definire l'apertura a della fenditura in micron è:

$$a = \frac{\lambda \times m \times D}{y}$$

Dove:

- λ è la lunghezza d'onda del laser in \AA (6500 i rossi e 5320 I verdi);
- m è l'ordine (che si suppone il primo)
- D è la distanza in mm dello schermo dalla fenditura
- y è la distanza in mm tra il massimo ed uno dei minimi del primo ordine delle due immagini di primo ordine della figura di diffrazione. (tutto in mm).

Es. con $D = 500 \text{ mm}$; $\lambda = 6500 \text{ \AA}$; $y = 10 \text{ mm}$, si ha :

$$a = \frac{1 \times 500}{10} \times 6500 \times \frac{1}{10^7} \text{ (fattore di conversione } \text{\AA}/\text{mm}) =$$

$$\frac{500}{10} \times \frac{6500}{10000000} = \frac{3250000}{100000000} = 0.032 \text{ mm} = 32 \text{ }\mu$$

Configurazioni di spettroscopi per spettroeliografia

Richiamerò, qui di seguito le due principali configurazioni di spettroscopi più diffuse tra i costruttori di spettroeliografi digitali, tralasciando le numerose altre configurazioni possibili, poco usate per la complessità del loro utilizzo in campo amatoriale.

1- Lo spettroscopio in configurazione classica

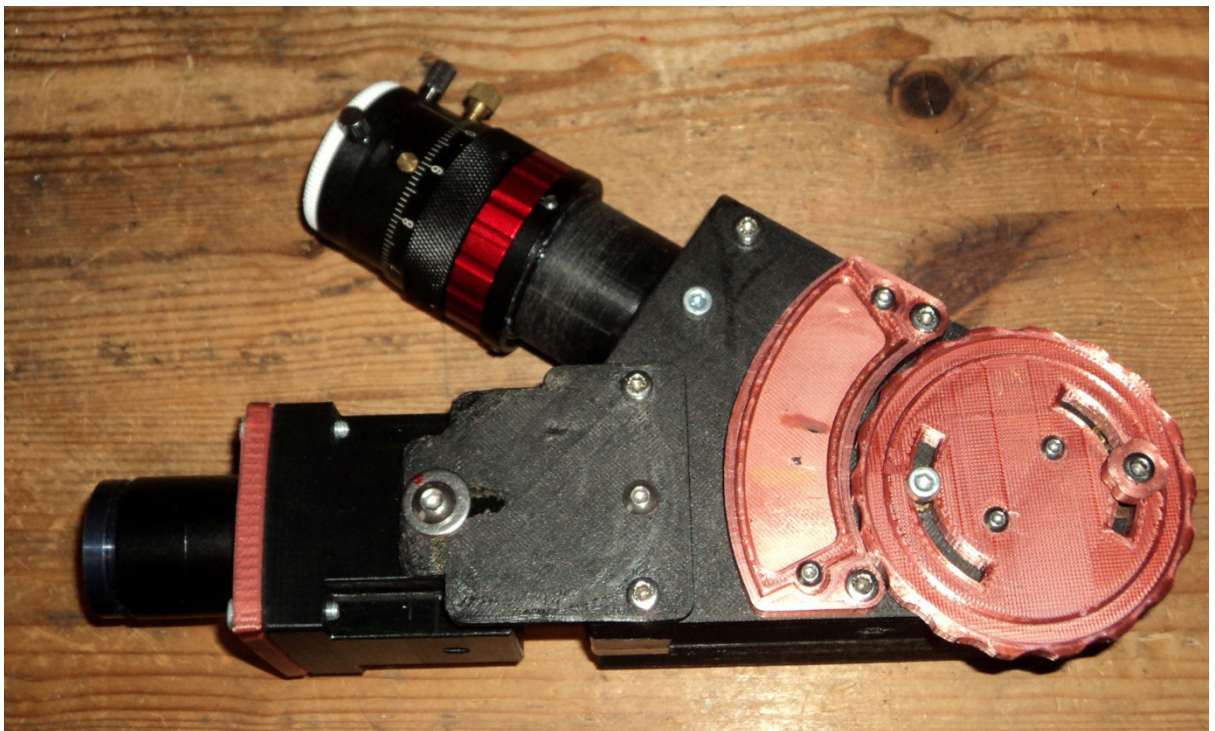
Questa configurazione è stata ed è forse la più diffusa in molti progetti di autocostruzione. Essa si fonda sull'utilizzo di due ottiche, generalmente a rifrazione per contenere le dimensioni, ma anche a riflessione: una che funge da collimatore, il cui fuoco cade sulla fenditura, ed al cui termine, dopo l'obiettivo, si trova il reticolo, ed una seconda, posta ad un certo angolo con la prima (circa 40°), che raccoglie il fascio ottico diffratto che esce dal reticolo, ovvero lo spettro, per ingrandirlo ed inviarlo alla camera di ripresa.

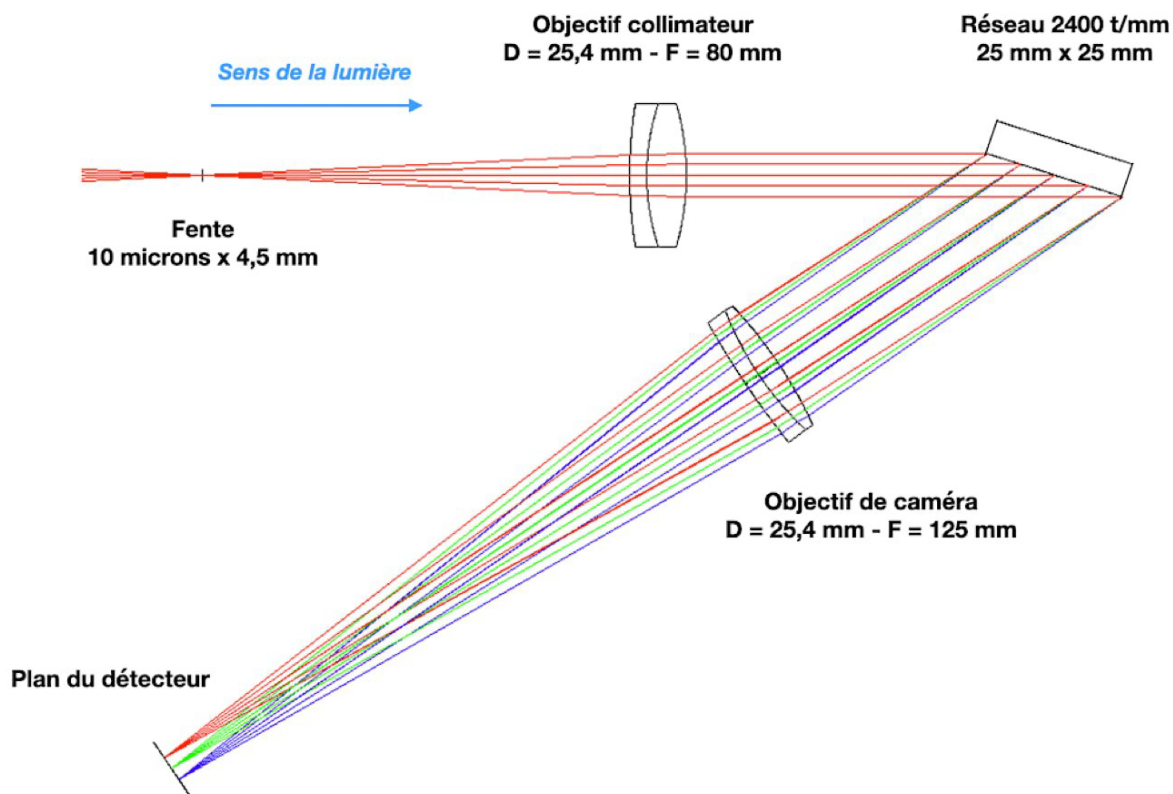
Il rapporto focale F/D del collimatore dovrebbe essere pari o molto simile a quello del telescopio che invia l'immagine solare sulla fenditura.

Un esempio di spettroscopio solare in configurazione classica è quello del progetto "Sol Ex" di C.Buil, utilizzabile anche in modalità spettroeliografo digitale con il software di conversione "INTI" di Valerie Desnoux ed altri.

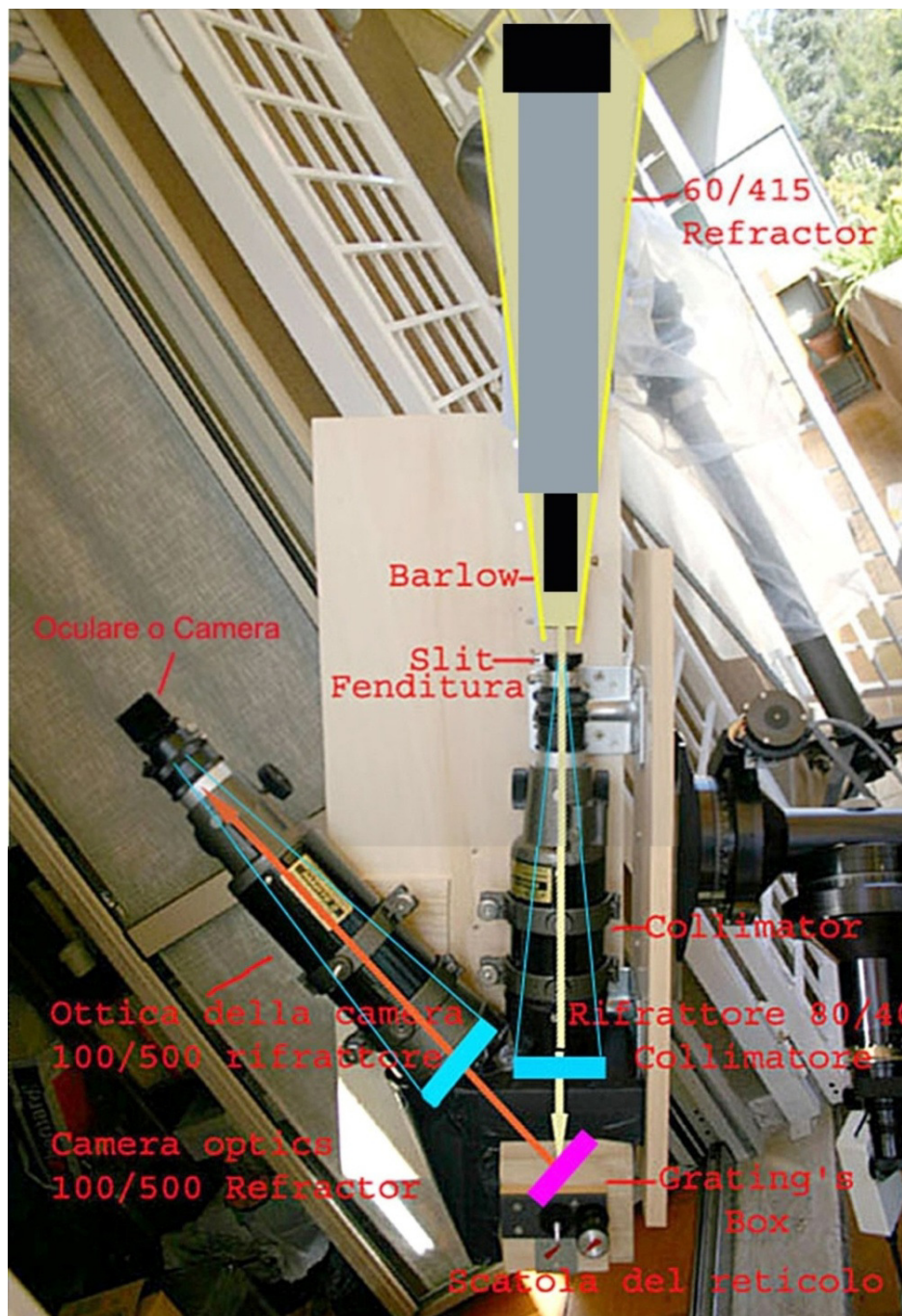
<http://www.astrosurf.com/solex/sol-ex-presentation-en.html>

Il progetto ha la caratteristica di poter essere realizzato con una stampante 3D ed un kit ottico della ditta Shelyak. Sotto l'immagine di un esemplare di tale strumento in mio possesso. Come si osserva, l'angolo tra le ottiche di collimazione e di osservazione è di circa 38° e la focale del collimatore è di 80 mm , mentre quella dell'obiettivo della camera di 125 mm.





Tale configurazione ottica, ottimale per le corte focali, presenta tuttavia a mio avviso l'inconveniente di diventare problematica per le focali medio-lunghe, dal punto di vista dell'ingombro e del peso, necessitando di tre ottiche per essere utilizzata per spettroeliografia. Di seguito un esempio di spettroeliografo autocostruito dall'autore utilizzando un rifrattore acromatico a corta focale 60/415 come telescopio che invia l'immagine solare alla fenditura ed uno spettroscopio in versione "classica" formato da un'ottica di collimazione, (un rifrattore acro 80/400) e, come ottica della camera, un rifrattore acro 100/500. L'ingombro ed il peso eccessivo di questa configurazione mi indussero a trovarne altre meno impegnative.



2 - La configurazione Littrow auto collimante

1-Configurazione Littrow: perché?

Quando ho iniziato l'avventura della spettroeliografia solare, mi sono posto, per lo spettroscopio, il problema:

a-quale configurazione ottica scegliere per l'alta risoluzione;

b-se utilizzare lenti o specchi;

c-in che modo minimizzare le dimensioni, il peso ed il numero di componenti ottici del nascente strumento.

Le varie configurazioni ottiche per spettroscopia, pur essendo ottime sotto il profilo della qualità delle immagini ottenibili, si dimostravano carenti, per quanto mi riguardava, dal punto di vista delle dimensioni, del peso e della trasportabilità. Certo, non è detto che un simile strumento debba essere per forza trasportabile da un posto all'altro, ma tale caratteristica, nella mia idea, avrebbe aggiunto una marcia in più al progetto. Le configurazioni più sofisticate, inoltre, con un certo numero di elementi ottici, presuppongono un'attenta collimazione, spesso difficile da ottenere in modo completo, e comunque laboriosa.

Nella convinzione, quindi che quello che non c'è non crea problemi, la mia configurazione ideale avrebbe dovuto avere il minimo possibile di componenti ottici: tale ultimo requisito è posseduto da una soltanto delle configurazioni spettroscopiche, quella Littrow.

Tale configurazione ottica fu ideata e sviluppata dall'astronomo viennese Otto Von Littrow nel 1862 e prevede, in modo assolutamente geniale, di utilizzare una sola ottica come collimatore e della camera, facendo compiere alla luce un doppio passaggio: in ingresso, dalla fenditura come fascio di luce diretto all'elemento ottico ed al reticolo e di ritorno, dopo aver colpito quest'ultimo, sotto forma di fascio diffratto (spettro) diretto all'elemento di registrazione dell'immagine od all'oculare tramite un prisma od un piccolo specchio deviatore.

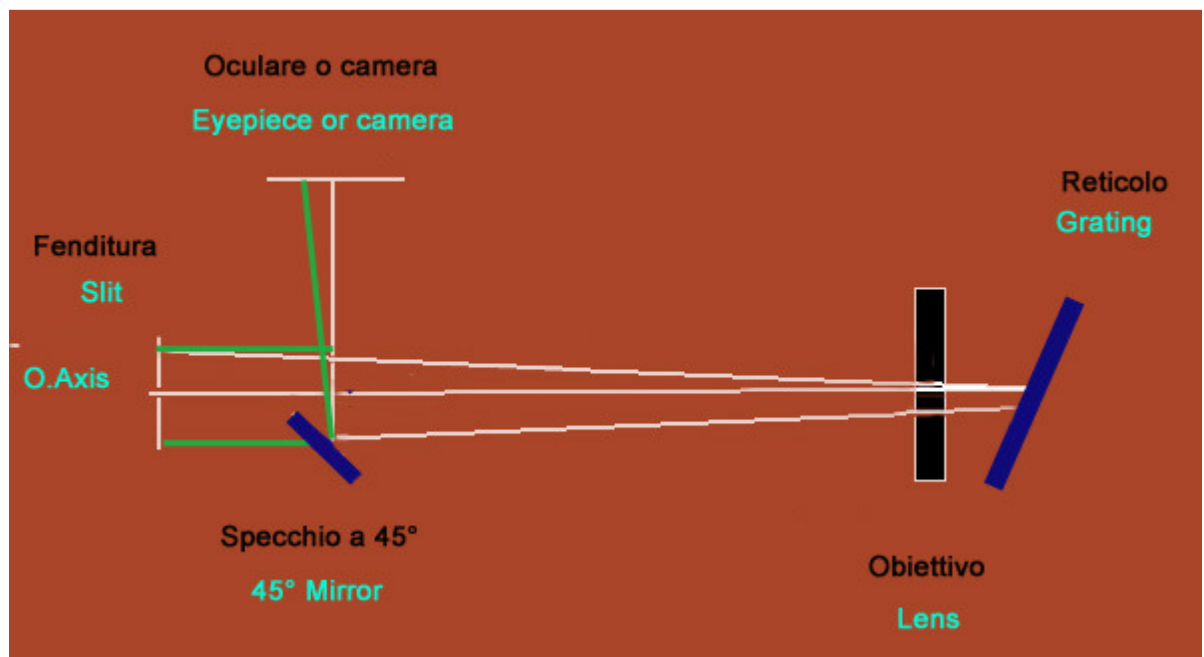
Tale configurazione, minimizzando la deviazione angolare, ha due enormi vantaggi:

1- Bassa dispersione e alta risoluzione;

2- Estrema compattezza strumentale (compatibilmente con la focale usata).

Tra gli svantaggi, sussiste quello dalla luce diffusa derivante dalla doppia riflessione sulle superfici ottiche e da una leggera curvatura dello spettro (smile), che è tuttavia di gran lunga inferiore a quella della configurazione classica. Nell'immagine il layout della configurazione Littrow adottata con VHIRSS, con specchio di rinvio lontano dalla camera, alla base del box.

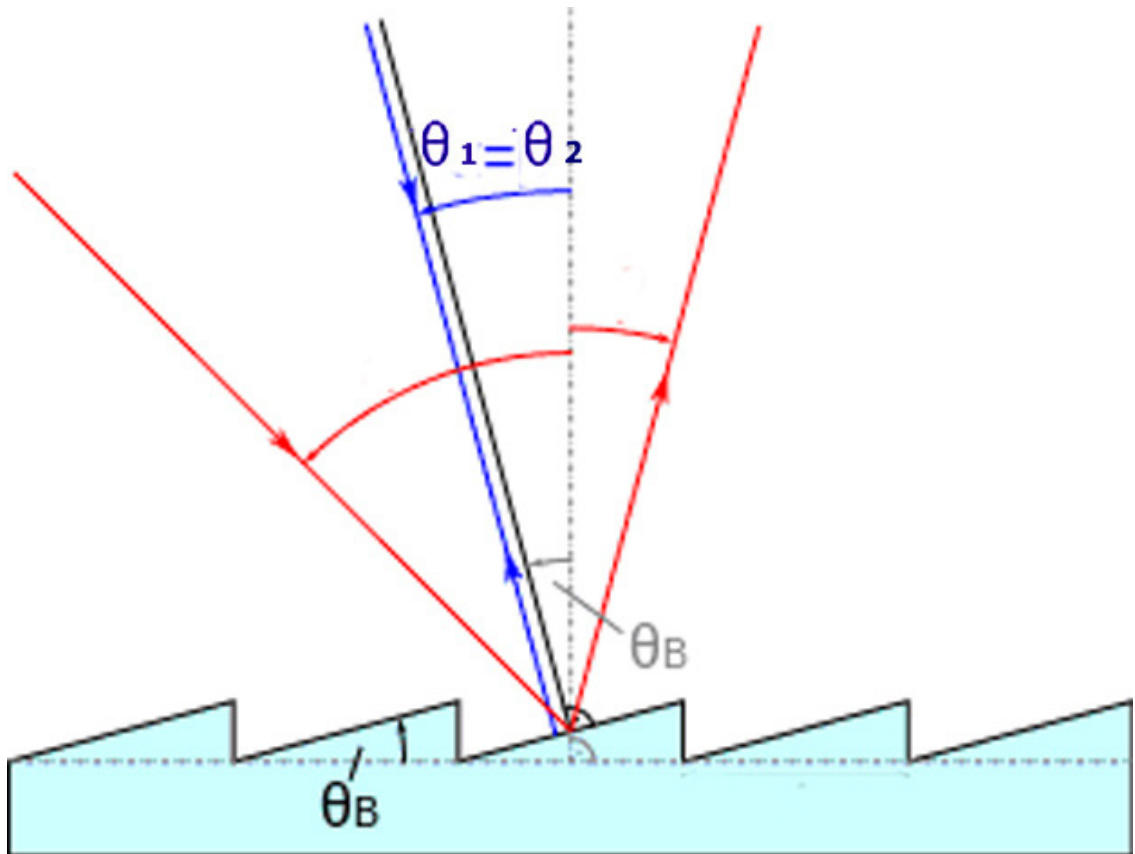
In più, nel mio strumento, la configurazione Littrow è stata da me modificata ponendo la fenditura circa 10 mm fuori dell'asse ottico, nella direzione perpendicolare all'asse longitudinale della fenditura; quindi io parlo di "Littrow modificato" .



La configurazione Littrow sul piano tecnico

Nella configurazione Littrow o autocollimante , come si è detto, esiste una sola ottica che agisce contemporaneamente da ottica di collimazione e della camera. In essa il raggio luminoso incidente e diffratto hanno lo stesso angolo, in quanto la luce fa un doppio passaggio prima di raggiungere il sensore, e questo angolo è l'angolo di "blaze" del reticolo (ovvero l'angolo delle incisioni del reticolo).

In essa quindi è $\theta_1 = \theta_2 = \theta_b$, dove θ_b è l'angolo di blaze. Nella configurazione Littrow inoltre il fattore anamorfico, ovvero il rapporto tra l'angolo del raggio in uscita diffratto e quello in entrata θ_2/θ_1 vale 1.



La formula generale del reticolo

$$m \times \lambda \times r = \sin \theta_1 + \sin \theta_2$$

dove m è l'ordine; λ la lunghezza d'onda e r il numero di linee per mm del reticolo

in questo caso diventa:

$$m \times \lambda \times r = 2 \sin \theta_b \quad (1)$$

da cui:

$$\sin \theta_b = m \times \lambda \times r / 2 \quad (2)$$

$$\theta_b = \arcsin (m \times \lambda \times r / 2) \quad (3)$$

La condizione Littrow è importante anche perchè tutti i reticoli commerciali ruled riportano solo l'angolo di blaze (inclinazione delle incisioni del reticolo) ipotizzando una configurazione Littrow, ovviamente nell'ordine 1, anzi si può dire che i profili delle incisioni e l'angolo di blaze sono calcolati proprio per la configurazione Littrow. Per esempio: nel catalogo Edmund un reticolo di diffrazione da 1200 l/mm blazed per 5000 Å è riportato con un angolo di 17°; applicando al caso in esame la formula (3) si ha, infatti, nel 1° ordine:

$$\theta_b = \arcsin (1 \times 5000 \times 10^{-7} \times r / 2) = \arcsin [(5000 \times 1200) / (10000000 \times 2)] = \arcsin 0.3 = 17.45^\circ$$

Ne consegue anche che tutte le relazioni fondamentali andranno riferite al solo angolo di blaze del reticolo dello spettroscopio.

Nell'esempio che precede, la dispersione angolare A in Å per gradi, definita dalla relazione:

$$A = [(\cos \theta_b / r \times m \times 10^{-7}) \times \pi / 180] \quad (4)$$

dove r è il numero di l/mm, m l'ordine, $\pi/180$ il fattore di conversione da radianti a gradi, sarà quindi:

$$A = (\cos 17.5 / 1200 \times 10^{-7} \times 1) \times \pi / 180 = 139 \text{ Å} / ^\circ$$

Per quanto riguarda i reticoli olografici non blazed, considerato che gli stessi convogliano il massimo dell'energia luminosa verso l'ordine 0 ($m=0$), si considererà un angolo di blaze θ_b pari a 0, ($\cos \theta_b=1$).

Un Littrow per lo spettroeliografo

Ammettiamo di voler progettare uno spettroscopio Littrow per uno spettroeliografo. Come specificato poc'anzi i punti vincenti di tale configurazione sono il potere risolutivo e ottiche di diametro adeguato dimensioni e peso ridotti: occorrerà quindi trovare una soluzione che risponda ad entrambe le esigenze

Il potere risolutivo spettrale dipende dai seguenti fattori:

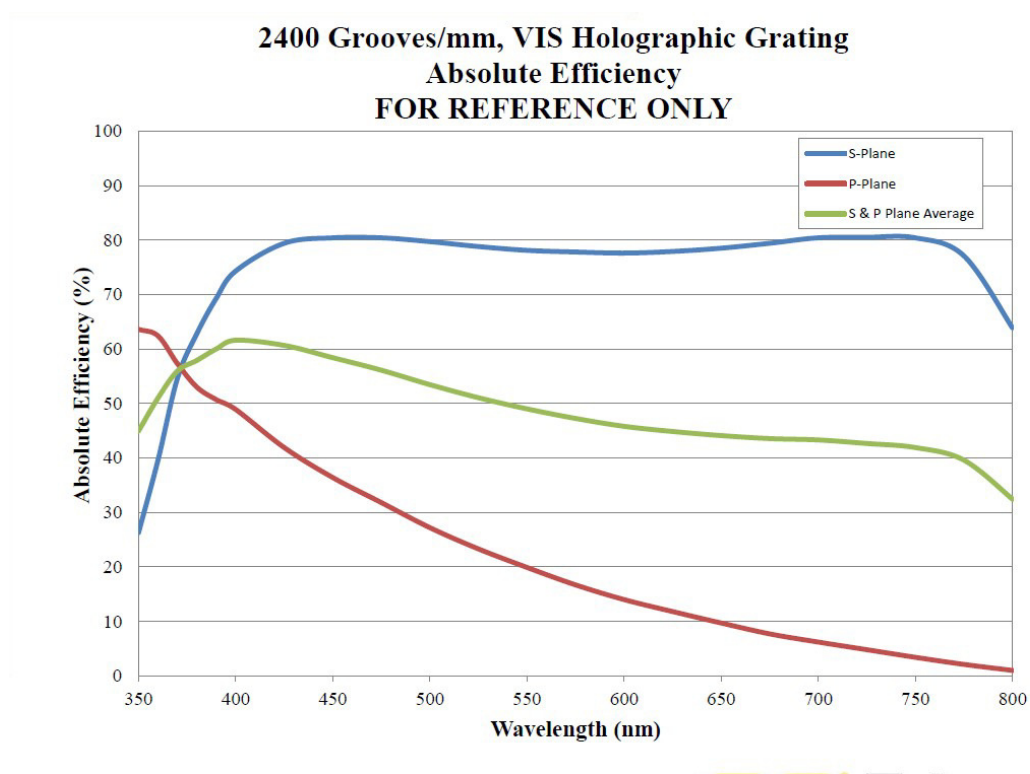
- Il numero di righe per mm del reticolo (aumenta con il loro aumentare)
- Le dimensioni del reticolo nell'ipotesi che venga completamente bagnato dal fascio ottico in ingresso. (aumenta con l'aumento di queste)
- L'apertura della fenditura (aumenta col diminuire di questa)
- Le dimensioni dei pixel della camera (aumenta col loro diminuire).

La dispersione invece tende a diminuire con l'aumentare del potere risolutivo, i due elementi si possono quindi considerare in relazione inversa.

Circa i primi due punti, occorrerà scegliere il reticolo a riflessione col massimo numero possibile di righe per mm, il più grande, e che contemporaneamente abbia un costo accettabile, in una parola un ottimo rapporto qualità prezzo. Corrispondono a tali requisiti i reticoli "ruled" blazed per il visibile da 1800 l/mm (il massimo possibile) nel formato 50X50; per i quali si consiglia un angolo di blaze per 500 nm; c'è da dire, tuttavia che tali reticoli non si trovano più oggi, in tale formato, nel catalogo dei principali produttori.

I reticoli olografici non blazed da 50 x 50 mm di lato da 2400 l/mm sono invece in catalogo di Edmund Optics e Thorlabs; questo tipo di reticoli al numero di righe più elevato 1800/2400 hanno un'efficienza quasi pari a quella dei reticoli ruled a prezzi relativamente accessibili. Nella figura un grafico dell'efficienza dei reticoli olografici da 2400 l/mm (fonte Thorlabs). Tutti gli spettroeliografi Littrow da me usati, eccetto uno, (4 in totale) sono dotati di tale tipo di reticoli.

Sulla base della mia esperienza con gli strumenti da me usati posso inoltre affermare che detti reticoli hanno un'efficienza elevata ed una resa ottimale dal vicino UV (Caii K-H) al rosso profondo (H alpha).



S e P plane costituiscono i diversi livelli di polarizzazione, ma esistono anche reticoli non polarizzati.

Sarà poi necessario scegliere il tipo di fenditura se fissa o regolabile, le sue dimensioni in lunghezza e l'apertura, ed al riguardo potremmo fare due ipotesi: quella di una fenditura chiusa a 30 μm ed a 10 μm (due ipotesi accettabili in una fenditura, regolabile o non, di buona qualità).

Per la camera ipotizzeremo un sensore con pixel piccoli ma non troppo, per non ridurre la sensibilità della camera diciamo 4.4-5.8 μm .

Fin qui i dati sul potere risolutivo spettrale,relativamente invece a:

Diametro e focale dell'ottica dello spettroscopio

Nell'ipotesi di voler usare un telescopio a F 7/8 per proiettare l'immagine del disco solare sulla fenditura, sarà necessaria di un'ottica dello spettroscopio all'incirca di tale rapporto focale, mentre il diametro di questa deve coprire la diagonale di un reticolo quadrato di 50 mm (50x 1.4) e quindi essere di almeno 70 mm di diametro. Un obiettivo di 80 mm andrà ancora meglio, e dovrà essere almeno a f 7-7.5. Esistono al riguardo sul mercato consumer ottimi obiettivi ED di tale diametro con vetri FPL 53 che si adattano perfettamente alle nostre esigenze e che si trovano abbastanza facilmente sul mercato dell'usato a prezzi intorno ai 300-350 €. Personalmente ho usato per la maggior parte dei miei strumenti tali obiettivi ED, da 80 mm a F 7.5 (600 mm di focale). Ne possiedo attualmente tre, facenti parte degli strumenti VHIRSS, POSS2 e Solarscan, che mi sono costati in media 250 € ciascuno usati: una cifra quasi ridicola in rapporto alle loro ottime prestazioni.

Parametri dello spettroscopio

Occorrerà quindi misurare i parametri di uno spettroscopio auto collimante dotato di un reticolo olografico da 2400 l/mm da 50 mm di lato ed un'ottica di focale di 600 mm, per un'apertura della fenditura di 10-15 micron ed una camera con pixel da 4.4 μm (tipo Imaging Source DMK 51 o Zwo ASI 174). I reticoli olografici di questo potere non sono blazed, ponendo, come si è detto, un angolo di blaze pari a zero (coseno uguale ad 1) sarebbe:

1- La dispersione angolare definita dalla relazione (4) è pari a :

$$A = [\cos \theta / (2400 \times 10^{-7} \times 1)] \times \pi / 180 = (1 \times 100000 / 24) \times 3.14 / 180 =$$

$$72.68 \text{ \AA} / ^\circ$$

2-La dispersione lineare:

La dispersione lineare DL in $\text{\AA}/\text{mm}$ è definita dalla relazione:

$$DL = \cos \theta / (r \times m \times F_{\text{cam}}) \quad (5) ;$$

dove F_{cam} è la focale dell'ottica della camera, nel nostro caso l'unica

r è il n° di linee per mm del reticolo

m è l'ordine

Sarà quindi:

$$DL = \cos \theta / [(2400 \times 10^{-7} \times 1) \times 600] = 6.94 \text{ \AA} / \text{mm} = 0.0069 \text{ \AA} / \mu\text{m}$$

e, per pixel da 4.4:

$$DL = 0.0069 \times 4.4 = 0.030 \text{ \AA} / \text{pixel}$$

3 – Il potere risolutivo a 5000 e 6563 \AA

La relazione del potere risolutivo è:

$$R = \lambda / d\lambda \quad (6)$$

Essendo:

$$d(\lambda) = dL_f \times DL \quad (7)$$

dove dL_f è l'ampiezza della fenditura proiettata sul piano del sensore e DL la dispersione lineare in \AA per mm.

Per un apertura della fenditura da 15 micron

$$d \lambda = 0.015 \times 6.94 = 0.10$$

A 5000 Å

$$R = \lambda / 0.10 = 5000 / 0.10 = 50000$$

e, a 6563 Å (riga H alpha):

$$R = 6563 / 0.10 = 65630$$

Per un apertura della fenditura da 10 micron

$$d \lambda = 0.010 \times 6.94 = 0.0694$$

A 5000 Å

$$R = \lambda / 0.0694 = 5000 / 0,0694 = 72046$$

e, a 6563 Å (riga H alpha):

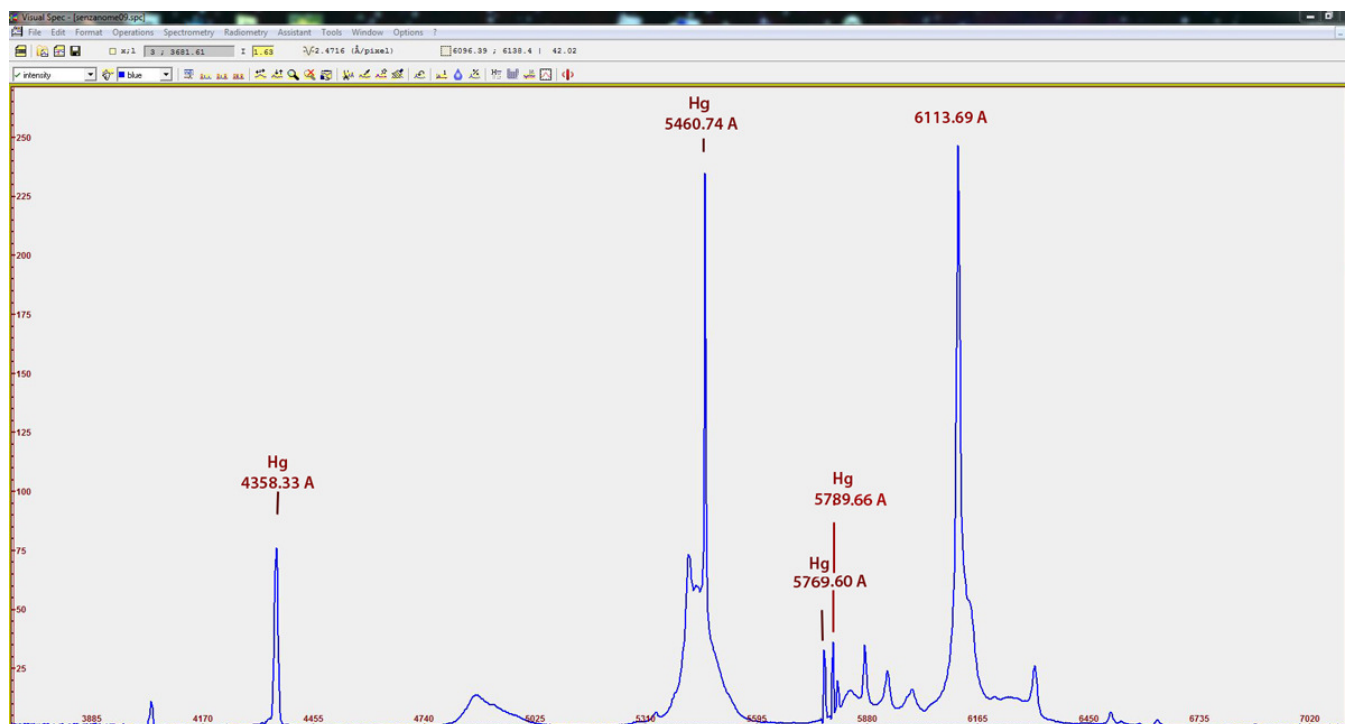
$$R = 6563 / 0.0694 = 94567$$

Come si vede, e si può osservare anche ad occhio su qualsiasi spettro, la chiusura della fenditura ha un effetto immediato ed importante sulla incisione dell'immagine spettrale. Molte volte mi è capitato di non riuscire a mettere a fuoco, foccheggiando e rifocheggiando, per aver dimenticato la fenditura troppo aperta e quindi ottenendo uno spettro flou e non inciso, anche con una perfetta messa a fuoco.

I valori teorici di dispersione lineare e risoluzione calcolati in precedenza si accordano in linea di massima con quelli da me ottenuti. Usando lo spettrografo VHIRSS in modalità spettroeliografo digitale. I

valori effettivi sul campo, misurati col software Visual Spec, della dispersione lineare rispetto a quelli teorici sono 0.02 anziché 0.03 Å /pixel con pixel da 4.4 micron e fenditura aperta a circa 13- 15 micron (nella mia fenditura regolabile economica non si può ricavare direttamente l'apertura esatta, quindi i dati potrebbero anche coincidere); è bene precisare, al riguardo, che minore è la dispersione, meno esteso è lo spettro, e più grandi appaiono le righe. Per quanto riguarda il potere risolutivo spettrale i valori teorici calcolati vengono ad essere anche notevolmente variati nella pratica delle osservazioni sulla base del seeing diurno , dalla messa a fuoco, e dall'apertura della fenditura; con VHIRSS ho misurato in media $R = 43000$ sul campo con fenditura aperta 17-20 micron circa. Se si vuole misurare il PR dello strumento si può farlo indoor, puntandolo (con la fenditura chiusa alla posizione di lavoro, e la più stretta possibile) verso una sorgente luminosa come una lampada a basso consumo od una lampada al neon, ottenendo lo spettro calibrato e misurando la FWHM della riga più sottile. E' anche possibile la misura sulle righe dell'O₂ o l'H₂O atmosferico, righe che appartengono all'atmosfera terrestre e quindi stabili.

Qui di seguito lo spettro di una lampada a basso consumo ottenuto col mio spettroscopio stellare Spec 600: le righe sono facilmente individuabili.



Parametri del telescopio da usare per lo spettroscopio Littrow

Fin qui si è parlato dello spettroscopio Littrow, quello che nell'immagine di VHIRSS appare di colore nero, il cuore del sistema, parliamo ora del telescopio che proietta l'immagine solare sulla fenditura del predetto spettroscopio, quello che nella figura appare di colore blu, e che rende possibile l'uso dello spettroscopio come spettroeliografo.

Ipotizziamo al riguardo di voler usare un telescopio a f 7- 7.5 che dia nel contempo un'immagine del disco solare sulla fenditura non superiore a 8 mm (meglio 7 mm), nel caso si vogliano usare fenditure a basso costo di SurplusShed opportunamente modificate come detto in precedenza. La focale dovrà comunque essere tenuta bassa sia per contenere le dimensioni complessive dello strumento, sia per adattarsi alle dimensioni del sensore della camera al fine di produrre immagini intere del disco solare senza dover fare mosaici. Una focale di circa 500 mm, con un disco immagine sul piano focale di 4.7 mm potrebbe andare bene al nostro scopo se accoppiata, come vedremo, con un sensore CCD di adeguate dimensioni. Tale focale è comune ad una certa quantità di strumenti a lenti presenti sul mercato, sia acromatici che ED ed apocromatici. Personalmente, per il mio spettroeliografo VHIRSS ho usato un eccellente doppietto di origine militare da 62 mm e 480 mm di focale che in numerose prove ha letteralmente

surclassato quanto ad incisione e contrasto diversi rifrattori ED di pari diametro. Con alcuni sensori, come vedremo, la focale può anche spingersi sino a 560 mm, ed anche oltre, sempre nel presupposto di voler ottenere immagini solari a tutto disco in un sistema non eccessivamente lungo ed ingombrante, ma potrà anche ridursi ad un range di 350-450 mm senza apprezzabili diminuzioni di risoluzione complessiva del sistema : con Solarscan ho usato un Takahashi FS 60 C da 355 mm di focale. In proposito, l'uso di piccoli rifrattori ED , magari acquistati sul mercato dell'usato sarebbe preferibile, altrimenti rifrattori a corto fuoco acromatici, purchè di buona qualità e privi di sferica da cromatismo.

La camera CCD o CMOS

Il tipo di sensore

E' l'ultimo dei componenti per il nostro spettroeliografo digitale, ma forse il più importante. La chiave del successo della spettroeliografia digitale è stato proprio l'avvento e l'affermazione dei sensori CCD e CMOS, la cui efficienza quantica (E.Q.) ha superato enormemente quella della vecchie lastre fotografiche con le quali vennero effettuati, alla fine dell'800, i primi esperimenti di spettroeliografia e quella della più moderna pellicola fotografica degli anni recenti. Premesso che l'efficienza quantica indica la risposta dei sensori, ovvero la capacità di convertire fotoni in elettroni attraverso lo spettro , l'EQ della pellicola fotografica si attestava in un range tra il 4 ed il 10% (per le pellicole iper sensibilizzate), inoltre questa era più alta nella parte blu dello spettro rispetto a quella rossa, tantè che le pellicole astronomiche professionali venivano ipersensibilizzate per il rosso (famosa la Kodak 103 AO). I moderni sensori CCD e CMOS arrivano ora a EQ dell'80, 90, e persino 100%.

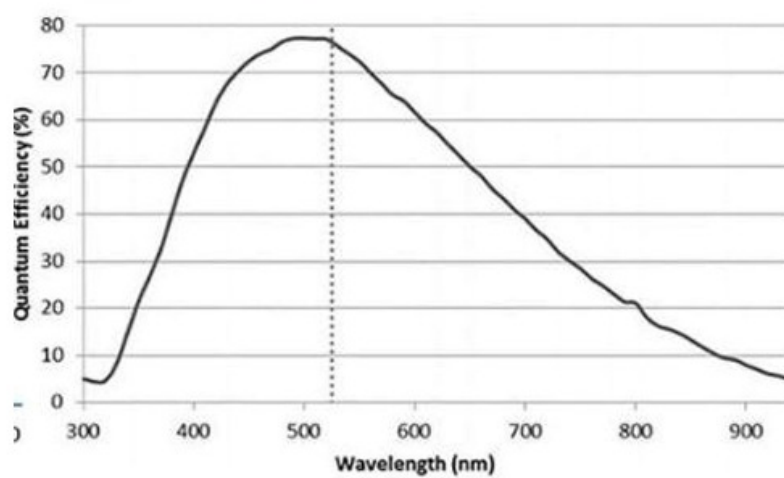
Qui tuttavia non si parla di camere CCD o CMOS che danno immagini singole, ma di videocamere, capaci quindi di registrare filmati, ovvero il filmato del passaggio del disco solare sulla fenditura, come vedremo. Queste vanno dalle semplici e poco costose webcam alle sofisticate e quindi costose camerine astronomiche come le Imaging Source DMK nelle varie versioni con sensore CCD , in particolare DMK 51, oggi non più in produzione e rinvenibili nel mercato dell'usato, e le ZWO ASI o equivalenti con sensore CMOS Sony. Molto performanti per i nostri scopi sono la 174 mm, la 178 mm e la 183 mm, ovviamente non raffreddate, a 12 bit. La vecchia DMK 51, che uso ancora con successo, e si trova sul mercato dell'usato, ha la caratteristica di un elevato contrasto ed un' elevata sensibilità nel vicino UV che la rende ideale

nella spettroeliografia delle righe del Calcio ionizzato; la dinamica del sensore è a 8 bit.

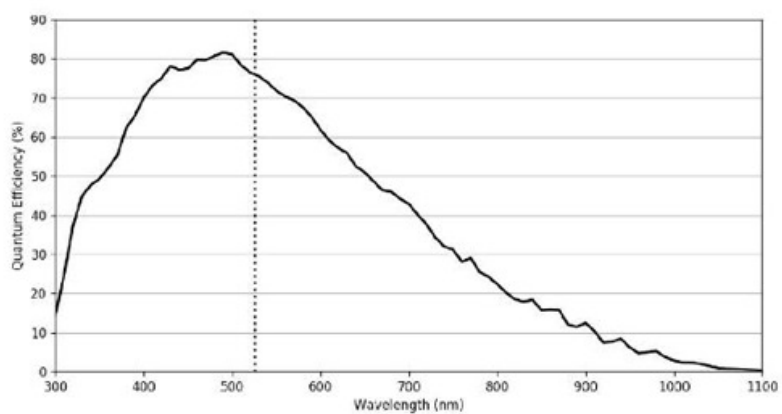
In quest'ultimo periodo si è osservato un vero e proprio boom dei sensori CMOS per videocamere che, grazie all'elevato frame rate rispetto ai CCD, consentono, specie nell'astrofotografia planetaria, di ottenere eccellenti risultati con oggetti luminosi per i quali il binning dei pixel, possibile nei CCD ma non nei CMOS (a parte un binning via software) non è necessario. In tale campo i CMOS hanno sicuramente superato i CCD.

E per la spettroeliografia? Qui la questione è complessa, per un semplice motivo: nonostante l'enorme flusso luminoso che arriva dal sole, la luce che arriva alla camera è modesta, se non esigua. Questo può sembrare strano, ma è perfettamente logico se si pensa al fatto che la incisione e qualità delle immagini spettroeliografiche, a parità di altri fattori, dipende dalla chiusura della fenditura: con aperture di 10-15 micron (od anche inferiori) e l'eventuale uso di filtri la luce in arrivo è modesta e la maggiore sensibilità dei CCD può avere la meglio. D'altro canto l'elevato frame rate dei CMOS, in certe condizioni, insieme ai pixel più piccoli, può essere un arma vincente. Inoltre, occorre considerare che molte camere con sensori CCD, datate o meno, come la DMK 51, hanno una dinamica a 8 bit, mentre le moderne CMOS lavorano a 12 o 16 bit, e questo costituisce un fattore importante per la migliore visibilità di alcune caratteristiche della cromosfera solare. C'è poi il fattore dell'efficienza quantica, la sensibilità del sensore nelle varie zone spettrali, per il quale i CMOS dell'ultima generazione, specie quelli retroilluminati, risultano superiori con una elevata EQ anche nell'ultravioletto vicino e nell'infrarosso. Qui tocchiamo anche un punto ulteriore a favore dei CMOS: la possibilità di usare sensori retroilluminati a costi inferiori a quelli dei CCD: le camere dell'ultima generazione, come la ZWO ASI 290 e la 183, che possiedo entrambe, sono appunto dotate di tali tipi di sensori che presentano una elevata sensibilità rispetto agli altri CMOS ed agli stessi CCD. Qui di seguito sono riportate le curve di efficienza quantica di alcune camere con sensori CMOS adatte per spettroeliografia. Inutile dire che per le applicazioni spettroeliografiche vanno usate solo camere con sensore in bianco nero, per la superiore sensibilità in condizioni di luce scarsa sul piano focale.

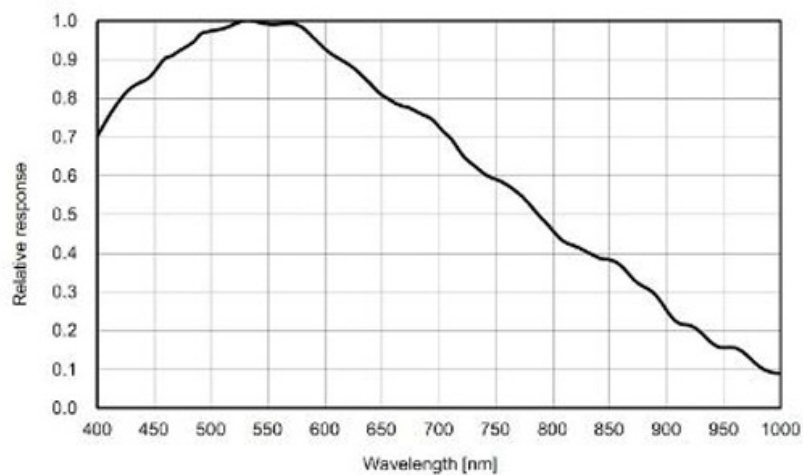
ASI 174 M.Q.E



ASI 178 MEQ

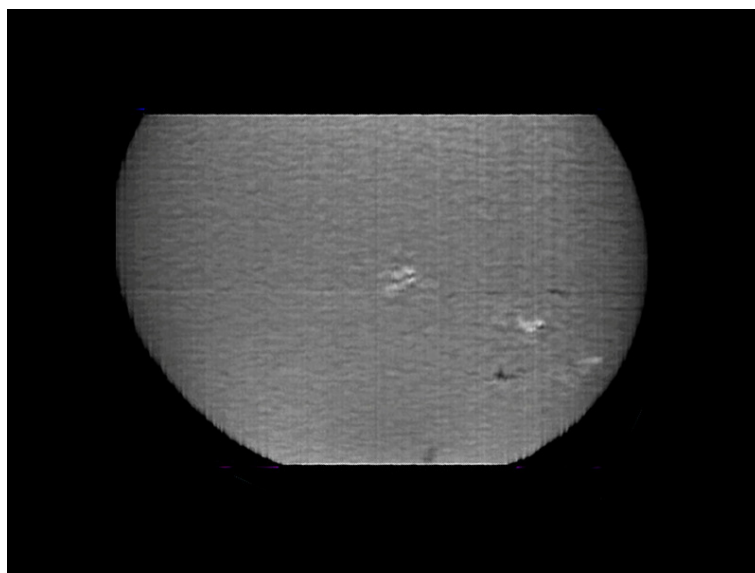


ASI 183 M.Q.E



Le dimensioni del sensore

Le dimensioni fisiche del sensore hanno importanza in quanto saranno queste a determinare (insieme alla lunghezza della fenditura) la parte del disco solare registrata dal CCD. Se, ad esempio, uso una webcam da con sensore Sony ICX 098 BQ da 3.6×2.7 mm ed un telescopio di 500 mm di focale che proietta un'immagine del disco solare di 4.7 mm sulla fenditura il file AVI registrato avrà una copertura di $3.6/4.7 = 0.76$, ovvero coprirà circa i $\frac{3}{4}$ del disco, ottenendo un'immagine parziale, come quella che segue, che fu la mia prima immagine solare registrata molti anni fa con una webcam Philips Toucam.



Se, invece useremo una DMK 51 con un sensore da 8.50×6.80 mm, allora la copertura sarà: $8.5/4.7 = 1.8$, quindi più che sufficiente per riprendere l'intero disco solare.

Questo discorso vale nell'ipotesi di spettroscopi Littrow con un'unica ottica, per i quali non è possibile cambiare il rapporto focale collimatore/focale della lente della camera. Nel caso invece di spettroscopi che usino entrambi gli elementi ottici, collimatore e lente della camera si potrà agire sulla focale di quest'ultima per ridurre l'immagine del disco solare alle dimensioni del sensore. Facciamo l'ipotesi di avere un telescopio di 700 mm che proietta un'immagine del sole di 6.5 mm di diametro, una ZWO ASI 224 con un chip di 4.8×3.6 mm, uno spettroscopio classico con un collimatore da 200 mm di focale ed una lente della camera anch'essa di 200 mm (rapporto pari a 1) il disco solare non entrerà completamente nel sensore, con uno spettroeliogramma parziale. Immaginiamo ora di cambiare la focale

della lente della camera da 200 a 100 mm: ciò produrrà una riduzione del fattore di ingrandimento di $100/200 = 0.5$, e quindi il disco solare avrà ora un diametro apparente di $6.5 \times 0.5 = 3.2$ mm ed entrerà nel chip della camera di cui si discuteva.

Le dimensioni dei pixel

Il seeing diurno, come si sa, è caratterizzato, anche d'inverno, da moti ascensionali d'aria causati dal riscaldamento del suolo, sino a circa 100 mt d'altezza. Sono proprio questi, a parte le masse d'aria in quota a provocare un peggioramento delle condizioni osservative diurne rispetto a quelle notturne: le cose peggiorano ulteriormente in presenza di strade, edifici manufatti di ogni tipo. Le condizioni ideali per l'osservazione diurna sarebbero quelle localizzate all'aperto in una vasta zona erbosa: ma non tutti hanno tale possibilità. Questa premessa è necessaria per affermare come nell'osservazione solare diurna, ancor più che in quella notturna a lunga posa, è il seeing e non il diametro dell'ottica a determinare la risoluzione raggiungibile: e ciò anche con tempi di integrazione più vicini a quelli dell'imaging planetario che a quelli del cielo profondo. Ipotizzando un seeing medio di 4", il campionamento necessario, secondo il criterio di Nyquist sarà quindi 2" per pixel, e, quindi la focale dello spettroscopio risultante sarà:

Con pixel da 4.4 μ m (DMK 51)

$$F = (0.0044 * 206265) / 2 = 453 \text{ mm}$$

Per pixel da 5.86 μ m (ZWO ASI 174) sarebbe

$$F = (0.00586 * 206265) / 2 = 604 \text{ mm}$$

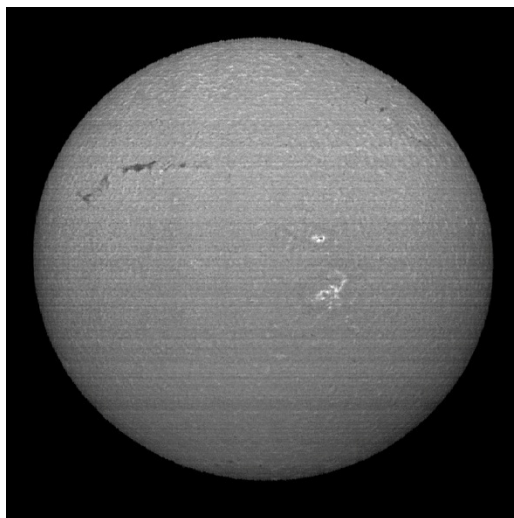
Per pixel da 2.4 μ m (ZWO ASI 183)

$$F = (0.0024 * 206265) / 2 = 247 \text{ mm}$$

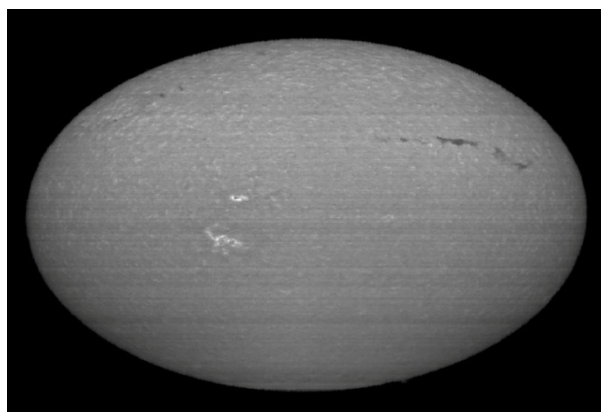
Tutto ciò in armonia con un'apertura della fenditura di 10-15 micron come detto in precedenza.

Il frame rate

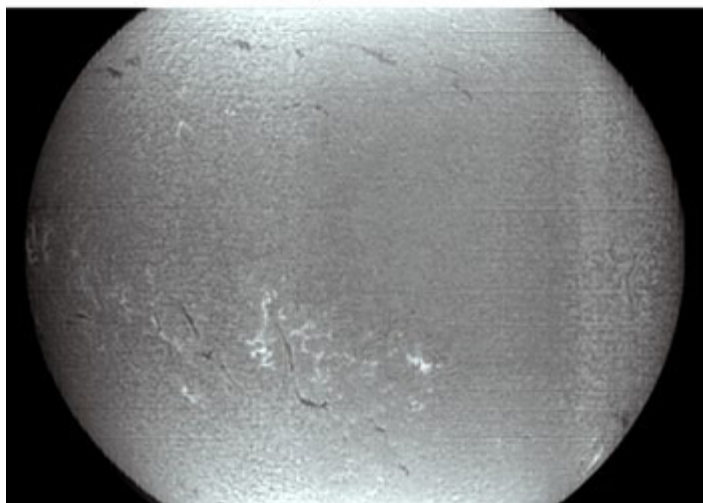
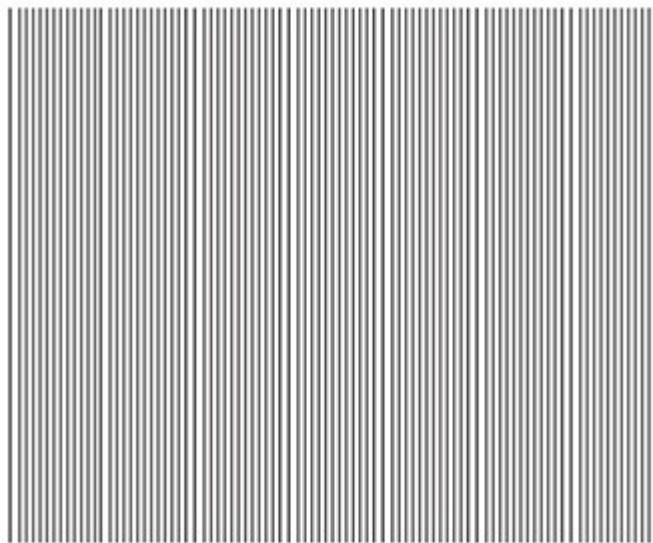
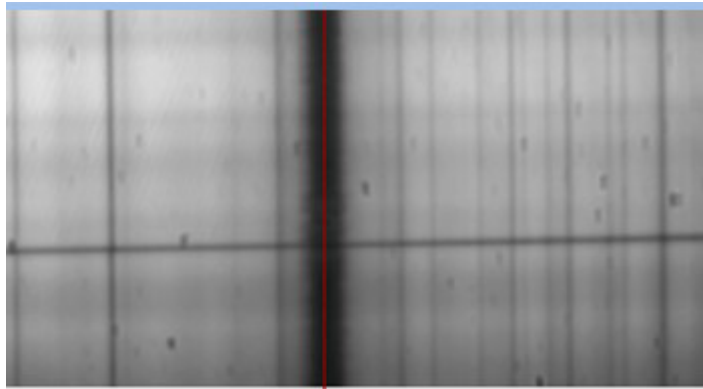
Il frame rate è importante in quanto da esso dipende la risoluzione in pixel dell'immagine lungo l'asse X (o Y, a seconda della posizione di fenditura e camera). Con una DMK 51 (orientata col lato maggiore del chip lungo l'asse AR, parallelamente allo spettro) una scansione di 160 sec ed un frame rate di 7.5 fps ottengo un'immagine che si estende lungo l'asse X per $160 \times 7.5 = 1200$ pixel bordi compresi (senza contare i frames persi). Lungo l'asse Y il formato è quello nativo della camera di 1200 pixel (in assenza di crop dell'immagine video). L'apparenza è all'incirca questa



Con un frame rate di 12 fps otterrei $160 \times 12 = 1920$ pixel per l'immagine completa lungo l'asse X, con un aspetto simile al seguente, che andrebbe riscalato per ottenere un'immagine rotonda del disco.



Tale problema di aspetto è stato oggi superato dal software di ultima generazione, che fornisce un'immagine squadrata del disco solare di date dimensioni in pixel partendo da qualsiasi livello di frame rate, anzi , un elevato livello di quest'ultimo può essere un vantaggio nel momento in cui si facciano scansioni brevi pilotate dalla montatura anziché quelle classiche di lasciare che il disco solare scorra sulla fenditura per il moto apparente del cielo. Il frame rate elevato con immagini a pieno formato potrebbe tuttavia dare problemi di download su PC non molto performanti con le camere dotate di USB 2.0. Per le ZWO ASI, che usano un bus 3.0, tale problema non sussiste su PC dell'ultima generazione. A questo punto, per far capire meglio al lettore quanto detto, è opportuno aprire una parentesi e fare una precisazione sulla modalità di acquisizione dei filmati e su quelle con cui operano i vari programmi di ricostruzione dell'immagine spettroeliografica partendo dal filmato di una riga dello spettro. Una volta messo il disco del sole sulla fenditura e centrata la riga sul video del PC nel programma di acquisizione della camera, (Firecapture, IC Capture etc) eventualmente facendo una ROI (Region Of Interest) si porta coi motori della montatura l'immagine del disco solare sul bordo superiore della fenditura dello spettroscopio si vedrà sullo schermo del PC la riga sparire, quindi si lancia l'acquisizione del filmato fermando subito i motori della montatura e lasciando che il disco solare scorra lungo la fenditura per effetto della rotazione terrestre. Durante lo scorrimento sullo schermo del PC la riga apparirà pian piano, diventerà sempre più grande, e poi sparirà al termine della scansione, che dura circa 3 minuti a 7.5 Fps (compresi i tempi morti). Ottenuto il filmato della scansione, tutti i diversi software non fanno altro che, una volta scelta la colonna di un pixel corrispondente ad un punto dello spettro del video (in genere il centro della riga, in rosso nell'immagine), affiancare a detta colonna tutte le altre dello stesso pixel dei frames che compongono il filmato.



Ammettendo quindi ad esempio che i frames complessivi del video ottenuto con la scansione siano 1200, avremo un'immagine di 1200 pixel sull'asse X e tanti pixel quanti sono quelli nativi del chip della camera sull'asse Y. Qui entra in gioco il vantaggio di una dispersione più bassa (con uno spettro più grande e concentrato) ed una risoluzione spettrale elevata: minore è la dispersione, più pixel ha una riga, e più volte si può operare detta sequenza, facendo poi lo stacking delle varie immagini ottenute durante la scansione. Quindi, se la riga H alpha, ad es., è larga, ad es. 60 pixel, io potrò ottenere 60 immagini di un pixel dei vari punti della riga, che potrò poi sommare per ottenere un'immagine integrata finale migliore. Non solo, ma, avendo l'accortezza di mettere un limite nel programma di acquisizione al numero dei frames, si hanno, per molteplici scansioni, immagini dello stesso formato, il che significa che potranno sommarsi tra loro frames di molte scansioni, nell'esempio precedente con 6 scansioni $60 \times 6 = 360$ immagini di 1 pixel di cui fare lo stacking.

Questo è uno dei motivi per cui ho progettato ed uso spettroeliografi ad alta risoluzione con focali medio-lunghe. Nell'immagine che precede è illustrata la sequenza descritta: dalla riga spettrale (nell'immagine l'H alpha) alla individuazione delle colonne di un singolo pixel che compongono la riga stessa ed alla scelta di quella che interessa, all'unione di tale colonna alla stessa di tutti i frames del filmato con l'ottenimento dell'immagine finale.

Nei software dell'ultima generazione, che operano direttamente sull'apparenza del disco solare nell'immagine (inclinazione, forma, centratura, e così via), nonché effettuano la squadratura dell'immagine stessa, la situazione è molto più complessa della semplificazione vista in precedenza, ma la sostanza resta più o meno la stessa.

Nota finale: la fenditura di uscita

Come si è visto, i progetti di spettroeliografi tradizionali presentavano due fenditure, una in ingresso, ed una in uscita, per motivi legati alla sintetizzazione delle immagini; negli spettroeliografi digitali questo non è necessario, dato che la sintetizzazione viene effettuata via software. Tuttavia, specie nel caso dei Littrow, è facile che si crei luce diffusa lungo il percorso ottico. L'uso di diaframmi interni è del resto piuttosto complicato in quanto, se non eseguito alla perfezione, rischia di creare ostruzione ai fasci ottici di ingresso e ritorno. Una soluzione estremamente facile è quello di utilizzare in uscita dello strumento un filtro interferenziale centrato sulla lunghezza d'onda della riga in esame, nella quale vogliamo ottenere l'immagine: questo vale, in fase di ripresa del filmato, ad eliminare buona parte della luce diffusa ed aumentare il contrasto. Detto filtro può essere inserito nel naso da 31.8 mm della camera. Una seconda soluzione, perlomeno con l'imaging H α , può essere quello di usare un filtro di rigetto posto davanti all'obiettivo del telescopio, ovvero lungo il suo percorso ottico. Anche i comuni filtri da 2" da 35-12 nm posti a circa 30 cm circa dal punto di fuoco possono essere utili allo scopo. Occorre tuttavia considerare, in tale ultimo caso, che alla lunga la radiazione UV può risultare dannosa per il coating dei filtri stessi, ragion per cui si consiglia l'uso di filtri UV-IR cut davanti a questi.

In conclusione:

Abbiamo analizzato in dettaglio i componenti di un SHG digitale, arrivando ad alcuni spunti interessanti che si accordano abbastanza bene con l'esperienza pratica portata avanti con i miei strumenti e cioè:

1-Per conciliare portabilità, compattezza, leggerezza ed alta risoluzione, spaziale e spettrale, la configurazione Littrow si presenta come la migliore in termini di efficienza complessiva, ovvero il rapporto prestazioni/dimensioni, peso e relativa facilità costruttiva. Nell'ambito di tale configurazione il telescopio, che invia l'immagine solare alla fenditura dovrebbe avere una focale intorno ai 500 mm ed un rapporto focale di F 7-8.

2-La fenditura, per accogliere l'immagine solare del suddetto telescopio dovrebbe avere una lunghezza di circa 7 mm (meglio 10-15mm), ed aperta ad almeno 10-15 μm o meno.

3-L'ottica dello spettroscopio dovrebbe avere un diametro di 70-80 mm a f 7: I rifrattori ED da 80 mm a f 7-7.5 sono i candidati ideali.

4-Il reticolo dovrebbe essere da 2400 l/mm e da 50 x 50 mm di lato o inferiore , in caso di strumenti più piccoli.

5-La camera di ripresa dovrebbe avere un sensore di grandi dimensioni e pixel medio-piccoli tra i 4 e 5 μm , ovvero pixel più piccoli in binning 2x2.

Naturalmente queste considerazioni hanno valore indicativo e non sono le tavole della legge. Ad es, nei miei tre strumenti principali (VHIRSS, POSS2 e Solarscan) in congiunzione con ottiche dello spettroscopio identiche (3 rifrattori ED da 80 mm f 7.5) ho usato ottiche di telescopio diverse, sebbene di ottima qualità (un 60 mm f 8; un 70 mm f5; un 60 mm f 6) eppure non ho notato particolari differenze nella resa dei tre strumenti in termini di risoluzione. Nulla vieta, ad es.(adeguando le dimensioni del chip della camera per l'immagine a pieno disco) e sacrificando lievemente dimensioni e peso, di adottare due 80 mm f 6.5 come telescopio ed ottica dello spettroscopio.

Gli strumenti per la spettroeliografia

Ho realizzato 5 progetti di Littrow, simili nel layout, ma diversi nelle dimensioni e peso, e ciascuno con diverse funzioni specifiche. Qualcuno potrebbe chiedersi: ma era proprio necessario costruire 5 strumenti simili per svolgere , in definitiva, le funzioni che uno solo di essi avrebbe potuto svolgere? La risposta a tale domanda è molto semplice:

- a) La costruzione dei 5 strumenti , in linea di principio abbastanza simili (anche se Solarscan è un caso a parte) mi ha permesso di verificare sul campo la ripetibilità del progetto.
- b) Da casa mia a Roma ho una finestra osservativa di circa 1-1,15 h,(dopo la quale il sole è coperto dal soffitto del mio balconcino) il che vuol dire che in questo periodo di tempo devo effettuare le riprese. In tale contesto, usare uno strumento (ad es.) già messo a punto sull'H α ed un altro sulla Ca II K, agevola moltissimo l'operatività e mi permette un'efficienza maggiore dedicando il poco tempo disponibile all'output anziché

alla messa a fuoco, alla centratura sulla riga ed alle altre operazioni di messa a punto della strumentazione. Ovviamente tali problemi non si verificano con Solarscan le cui procedure operative, controllate da PC, sono molto rapide e precise.

Naturalmente il mio è un caso particolare, ma forse non troppo, e comunque il piacere di dedicarmi a tale attività auto costruttiva ha superato qualsiasi inconveniente. Detto ciò, andiamo a parlare dei singoli strumenti, originariamente utilizzati come spettroscopi ad alta – media risoluzione e poi convertiti in spettroeliografi digitali.

1 *VHIRSS (Very **H**igh **R**esolution **S**olar **S**pectroheliograph)* : è stato il progetto più semplice, ma anche il più performante tra quelli assemblati in modo casalingo senza dover ricorrere, se non in minima misura, ad un'officina meccanica (filettatura del box in alluminio). Attualmente è dedicato alle riprese digitali della zona spettrale H alpha.

2 *POSS2 (**P**ortable **S**olar **S**pectroheliograph2)* : SHG Littrow ora dedicato esclusivamente alle riprese nella banda del calcio ionizzato CaIIK e H con l'uso di filtri specifici per isolare la radiazione UV.

3 ***SOLARSCAN*** è lo strumento principe dal punto di vista costruttivo, in quanto realizzato su mio progetto in modo eccellente dalla Avalon Instruments di Pomezia (Roma). Usato in un primo tempo come spettroeliografo, è stato successivamente da me modificato per la ripresa dell'effetto Zeeman sulle macchie solari e la misurazione dei campi magnetici delle macchie stesse.

4 *HIRSS2 (**H**igh **R**esolution **S**olar **S**pectroheliograph2)* è ora utilizzato solo per sperimentazioni di vario genere.

5 *UPS (**U**ltra **P**ortable **S**pectroheliograph)* date le sue ridottissime dimensioni e peso (una montatura Eq2 lo porta senza problemi) viene usato per la riga H beta e H gamma e per dimostrazioni sul campo in occasione di eventi di vario genere come spettroscopio e spettroeliografo.

I primi 4 sono strumenti ad alta risoluzione, con una focale dello spettroscopio di 600 mm ed un reticolo da 50 mm x 2400 l/mm, mentre il quinto è a media risoluzione, con una focale di 300 mm ed un reticolo da 25 mm. A questi si è aggiunto recentemente un littrow solare a bassa risoluzione, denominato MILSS (**M**ini **L**ittrow **S**olar **S**pettroscope/spectroheliograph).

Un primo esempio di Spettroeliografo digitale autocostruito ad alta risoluzione in configurazione Littrow: VHIRSS

Ma esaminiamo ora in dettaglio uno spettroeliografo digitale autocostruito da chi scrive: si tratta, come si è detto, di una configurazione autocollimante o Littrow. Realizzare uno spettroeliografo digitale è sicuramente molto meno complesso di uno spettroeliografo tradizionale, ma richiede comunque una buona dose di manualità, di capacità meccaniche e, principalmente, di esperienza nel campo del fai da te. Chi vuole mettere alla prova le sue capacità è bene sappia che non contano solo la preparazione teorica generale in astronomia e l'attitudine manuale, ma anche una minima conoscenza della spettroscopia e delle sue applicazioni pratiche.

Ciò in quanto, una volta realizzato lo strumento, occorrerà interpretare cosa con esso viene ripreso, ed un minimo di conoscenza preliminare agevolerà il compito. In generale il layout e gli schemi sono, in linea di principio piuttosto semplici, ma i problemi di allineamento delle ottiche e degli spettri aumentano in modo più che proporzionale rispetto alla focale delle lenti o degli specchi usati, quindi il suggerimento è di non superare focali dell'ordine di 600 mm per lo spettroscopio. Vorrei ora parlare dello strumento che più mi ha dato e mi dà tuttora soddisfazioni: VHIRSS acronimo di Very High Resolution Solar Spectrograph. L'architettura dello strumento è in linea di principio quanto mai semplice, ed è proprio questa sua semplicità costruttiva, unita al peso e dimensioni ridotte (8kg x 110 cm di lunghezza) che ne fa lo strumento che uso di più. Attualmente l'ho dedicato alle riprese della cromosfera solare in luce H alpha, ma ovviamente può essere utilizzato in qualsiasi lunghezza d'onda.

Qui di seguito il suo layout, nel quale si osserva un rifrattore Orion 80/600 ED come ottica dello spettroscopio ed un obiettivo da 62/480 di origini sconosciute ma prestazioni entusiasmanti come telescopio, adattato nel tubo blu di uno SW 70/500.



Il progetto iniziale

La filosofia del progetto è stata quella di realizzare uno strumento sofisticato e da prestazioni quasi professionali semplice da assemblare, disassemblare e trasportare, oltre che di peso ed ingombro non eccessivo. Ho quindi deciso la sua composizione in 5 elementi, ciascuno facilissimo da smontare, diminuendo quindi l'ingombro ed aumentando la facilità del trasporto. Le dimensioni sono all'incirca quelle di un buon rifrattore da 10 cm di apertura e 1000 mm di focale.

Gli elementi ottico-meccanici sono:

- La cassa contenente il reticolo ed il suo sistema di movimentazione, ricavati da un semplice paraluce di un rifrattore 102/500, non più in mio possesso. Non ho ritenuto di usare il paraluce stesso dell'ED 80 in quanto dovevo forarlo per far passare l'asse del reticolo, e preferivo intervenire su un pezzo che non mi era più di utilità.
- Il tubo del rifrattore Orion ED 80
- La cassa quadrata di alluminio 60 x 60 x 3 mm contenente lo specchio di rinvio quadrato di 20 mm e la fenditura regolabile.
- il tubo del telescopio rifrattore di surplus 62/480 usato per inviare l'immagine solare alla fenditura
- Un quadratino di acciaio di 3 cm di lato per 3 mm di spessore ed 1 mt di lunghezza usato come supporto per gli anelli dei due rifrattori, messi a punto in modo che il cono ottico del 62/480 fosse allineato con l'ingresso della fenditura ed a fuoco sulla stessa, ed il tutto presentasse una rigidità assoluta, senza alcuna flessione.
- Una slitta micrometrica per macrofotografia sulla quale installare il telescopio rifrattore da 62 mm per permetterne la precisa messa a fuoco sulla fenditura con un movimento di traslazione longitudinale.

Detto ciò, passiamo ai dettagli delle note costruttive:

1- Il reticolo

Il reticolo scelto è stato un reticolo olografico, non blazed, da 2400 l/mm acquistato dalla ditta Edmund Optics al prezzo (all'epoca) di 250 €, ora circa 360. È il reticolo col maggior numero di l/mm, e che quindi consente di ottenere la massima risoluzione possibile, a patto, ovviamente, che la sua superficie sia interamente coperta dal diametro del cono ottico dell'ottica di collimazione. Tale reticolo si è dimostrato di eccellente qualità, adeguata al costo non proprio trascurabile. Del resto, il reticolo di diffrazione costituisce il cuore di uno spettroscopio, e voler risparmiare su di esso è come voler comprare un'auto sportiva con un motore da 50 cc.

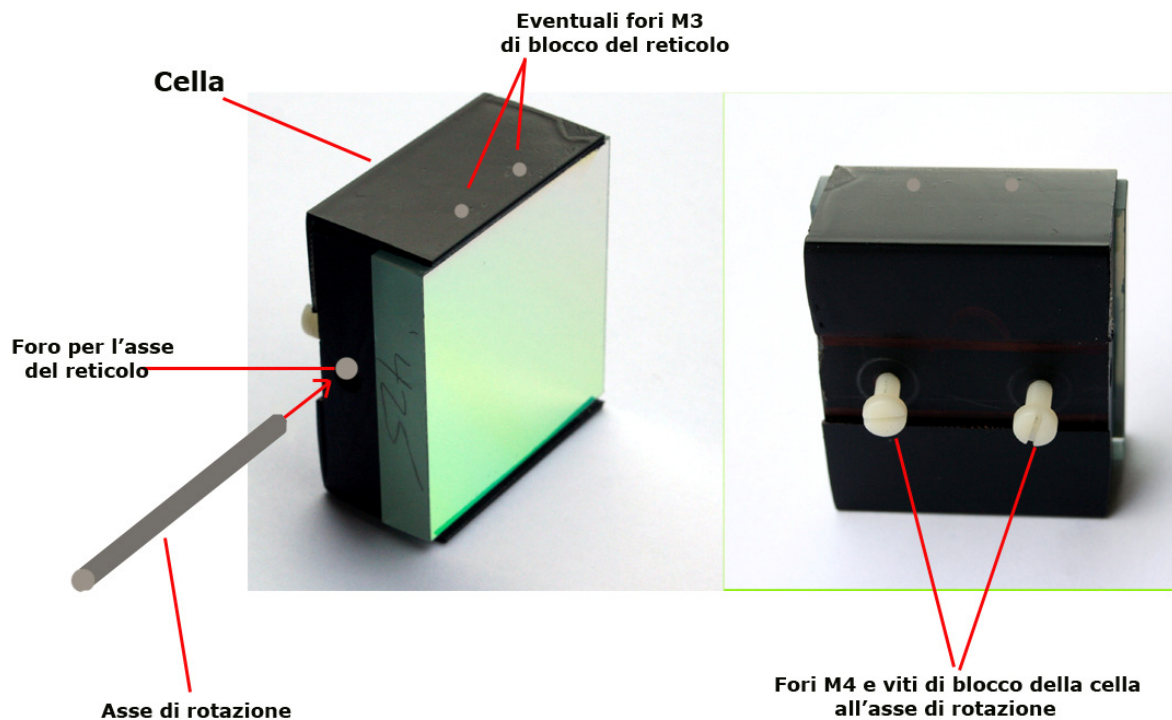
Ciò non toglie che, se si intende usare per lo spettroscopio un tubo ottico di apertura inferiore a 80 mm, va bene anche un reticolo da 30 mm di lato, di costo notevolmente inferiore (ca 225 €). Ovviamente il reticolo stesso va maneggiato con la massima attenzione, prendendolo dai lati, possibilmente con guanti di gomma senza talco, dato che eventuali segni di dita o rigature sulla sua superficie sono permanenti e non eliminabili. Il reticolo stesso va poi posizionato nella cella in modo tale che la freccia indicata su uno dei lati sia perpendicolare all'asse di rotazione e rivolta in direzione dell'ottica di collimazione. Si può facilmente verificare ciò tenendo il reticolo dal lato con la freccia, puntandolo verso una sorgente luminosa e facendolo ruotare: si deve osservare la striscia luminosa dello spettro, dal blu al rosso.

2-La cella del reticolo

E' questo un elemento non secondario, in quanto deve contenere il reticolo in modo perfetto senza forzarlo nella sede.

Personalmente ho fatto fresare un blocchetto di PVC nero 50 x 60 mm in mio possesso di circa 20 mm di spessore per una profondità pari allo spessore del reticolo (9 mm) in modo da accoglierlo perfettamente nella sua sede, nella cui parte posteriore era stato applicato del biadesivo. Ho ritenuto tuttavia opportuno bloccare il reticolo ancora meglio, filettando M3 le due parti superiore ed inferiore della cella, in modo da accogliere delle brucoline di fissaggio: tale fissaggio deve essere effettuato con la massima attenzione, dato che una pressione eccessiva potrebbe pregiudicare le prestazioni del reticolo (sarebbero consigliate viti o brucole in plastica).

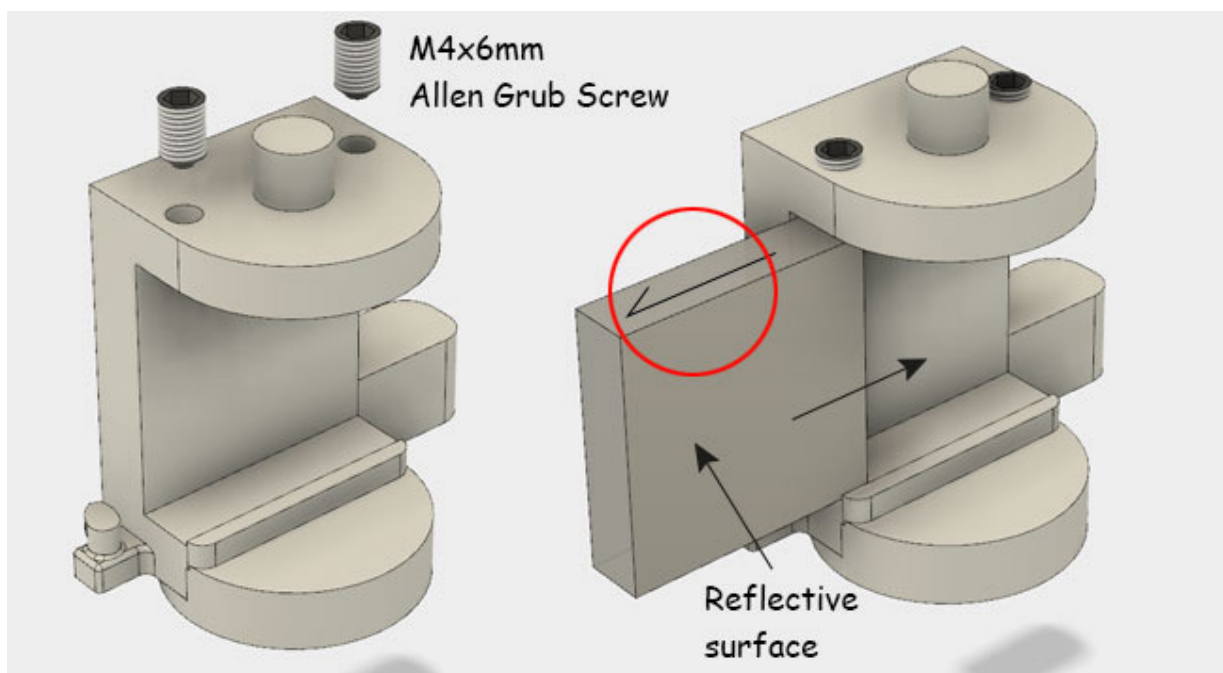
La cella è stata quindi forata longitudinalmente con un foro da 6 mm per accogliere l'asta di rotazione, e nella sua parte posteriore, lungo il foro longitudinale, forata con due fori filettati M4 destinati ad accogliere altrettante viti di blocco della cella stessa sull'asse di rotazione, in modo da renderla solidale a questa.



E' opportuno notare che con la sempre maggiore diffusione delle stampanti 3D, la cella del reticolo (come del resto altri componenti minori) potrebbe oggi essere convenientemente stampata su PLA o PVC con una stampante di buona risoluzione, come dal progetto "Low Spec" di Paul Gerlach <https://www.thingiverse.com/thing:2455390>

Stampanti 3D di notevole risoluzione e dai requisiti tecnici utili ai nostri scopi sono infatti oggi acquistabili a prezzi intorno ai 1000 €, e facilitano enormemente la realizzazione in materiale plastico di componenti secondari, ma importanti come il caso della cella testè descritto, che non devono per loro natura essere sottoposti a carichi eccessivi.

Nell'immagine una cella stampata 3D in PLA



E' bene precisare che il reticolo va collocato nella cella in modo che la freccia indicata sul lato dello stesso sia perpendicolare all'asse di rotazione della cella e punti verso l'ottica dello spettroscopio auto collimante: se collocato al contrario non si vede alcuno spettro. Inoltre l'asse di rotazione stesso deve essere parallelo alla fenditura nel senso della sua lunghezza.

L'asse di rotazione può essere scelto a piacere, comunque, dato il peso molto contenuto della cella e del reticolo, un settore di barra filettata M5 o M6 è più che sufficiente. Il montaggio del reticolo nella sua cella (e quindi i fori nel box che accoglie la cella stessa) va effettuato ad una distanza dall'obiettivo dello spettroscopio compatibile con la rotazione completa del reticolo stesso.

3-L'ottica di collimazione-osservazione

Come accennato, l'ottica usata per VHIRSS è stata quella di un Orion 80 ED (praticamente uguale allo SW 80 ED) da 80 mm di diametro e 600 di focale acquistata d'occasione a 250 €, dalle ottime prestazioni quanto ad incisione e contrasto. Data la sua versatilità per quest'uso, è stata da me adottata anche per gli altri due spettroeliografi Hires, Solarscan e POSS2. Oggi i prezzi sul mercato dell'usato sono più alti, ma ancora non è difficile trovare detti rifrattori a 350-400 €.

4- Il Box del reticolo

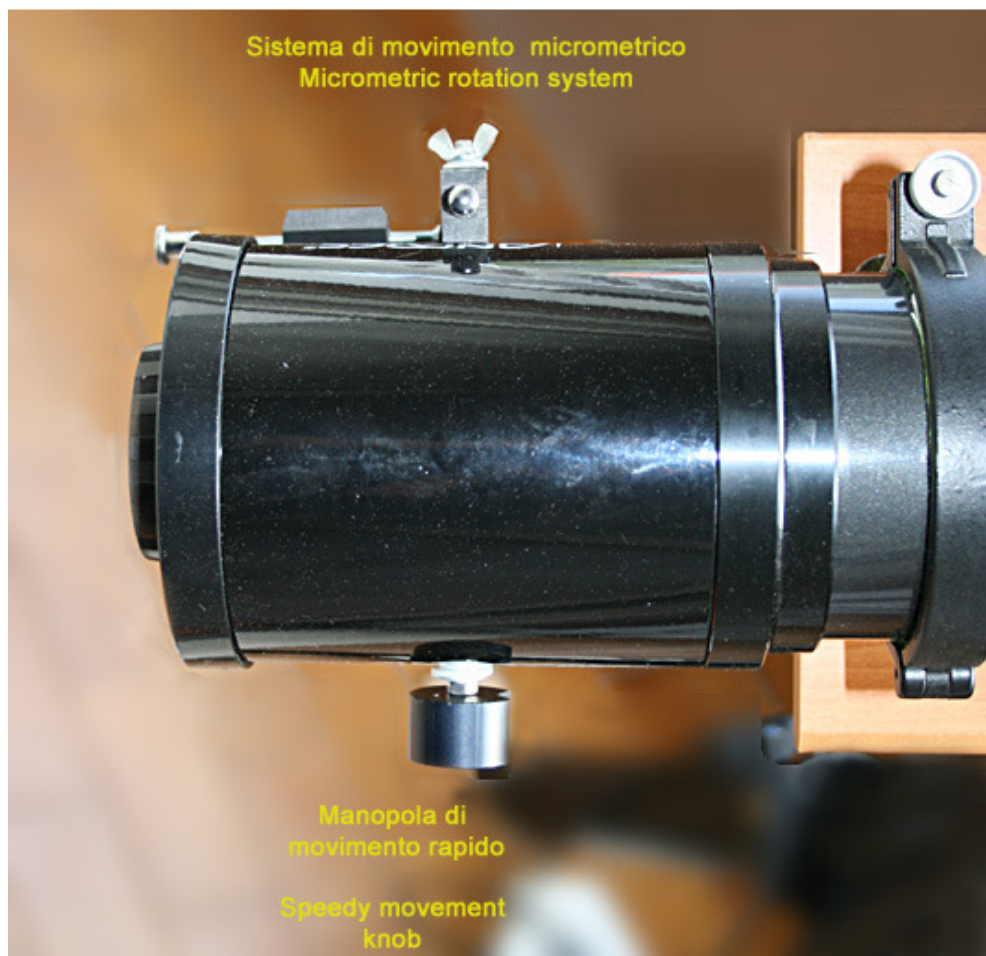
Il box (la scatola) nella quale inserire il reticolo può comodamente essere costituita dallo stesso paraluce dell'ottica dello spettroscopio. Nel mio caso, non volendo forare il paraluce originale dell'Orion 80 ED che costituiva l'ottica dello spettroscopio, ho usato il paraluce di un'ottica Antares da 100 mm già in mio possesso. Circa la foratura del Box (nel mio caso il paraluce), è meglio precisare che i fori nei quali va alloggiato l'asse devono essere assolutamente omologhi ed in linea, ottenuti con una punta lunga ed un trapano a colonna. Nell'immagine che segue si osserva il paraluce forato con l'asta di rotazione.

A proposito delle modalità di rotazione del reticolo nella sua cella, che, come si sa, serve a selezionare la lunghezza d'onda e la riga di interesse, ho cercato di coniugare la semplicità costruttiva con la massima efficienza nel basculamento, basilare ai fini dell'utilizzo dello strumento.

Negli spettroscopi stellari, data la bassa risoluzione, la modesta lunghezza dello spettro ed il ridottissimo range di rotazione, è conveniente usare un micrometro per selezionare la lunghezza d'onda: in quelli solari con focali oltre i 5-600 mm, la lunghezza dello spettro è notevole, ed andare da un estremo all'altro dello stesso con un micrometro diviene estenuante e seccante. Ho pensato allora di dotare l'asta di rotazione di due movimenti: uno rapido, ottenuto muovendo manualmente una manopola innestata su una delle estremità dell'asse, ed uno micrometrico a braccetto sulla parte opposta, che si aziona, sempre manualmente, mediante una apposita vite di frizione che va ad innestarsi sull'asse. Ovviamente la cosa più semplice sarebbe stata dotare l'asta di un movimento rotazionale comandato da un motorino elettrico, ma, a parte la complicazione, l'esperienza mi ha insegnato che affidare in modo esclusivo ad un motore elettrico ed a delle pile un compito basilare per il funzionamento di un dispositivo può essere fonte di disagi. Consiglierei quindi, in ogni caso, che il motorino sostituisca il moto micrometrico manuale, lasciando comunque quello veloce azionabile a mano.

Naturalmente per chi possiede le necessarie conoscenze di elettricità ed elettronica non costituirebbe un problema l'uso di motori passo passo per la regolazione fine non solo del basculamento del reticolo, ma anche del sistema di foceggiatura del telescopio e dello spettroscopio, magari comandati da PC, come avviene nel mio più sofisticato Solarscan.

Nell'immagine il box ed i due sistemi di regolazione del movimento della cella del reticolo, quello veloce e quello micrometrico.



Qui di seguito il dettaglio del movimento micrometrico, estremamente semplice da realizzare anche con mezzi casalinghi. Il braccetto in PVC inserito nell'asse può essere di qualsiasi materiale, meglio

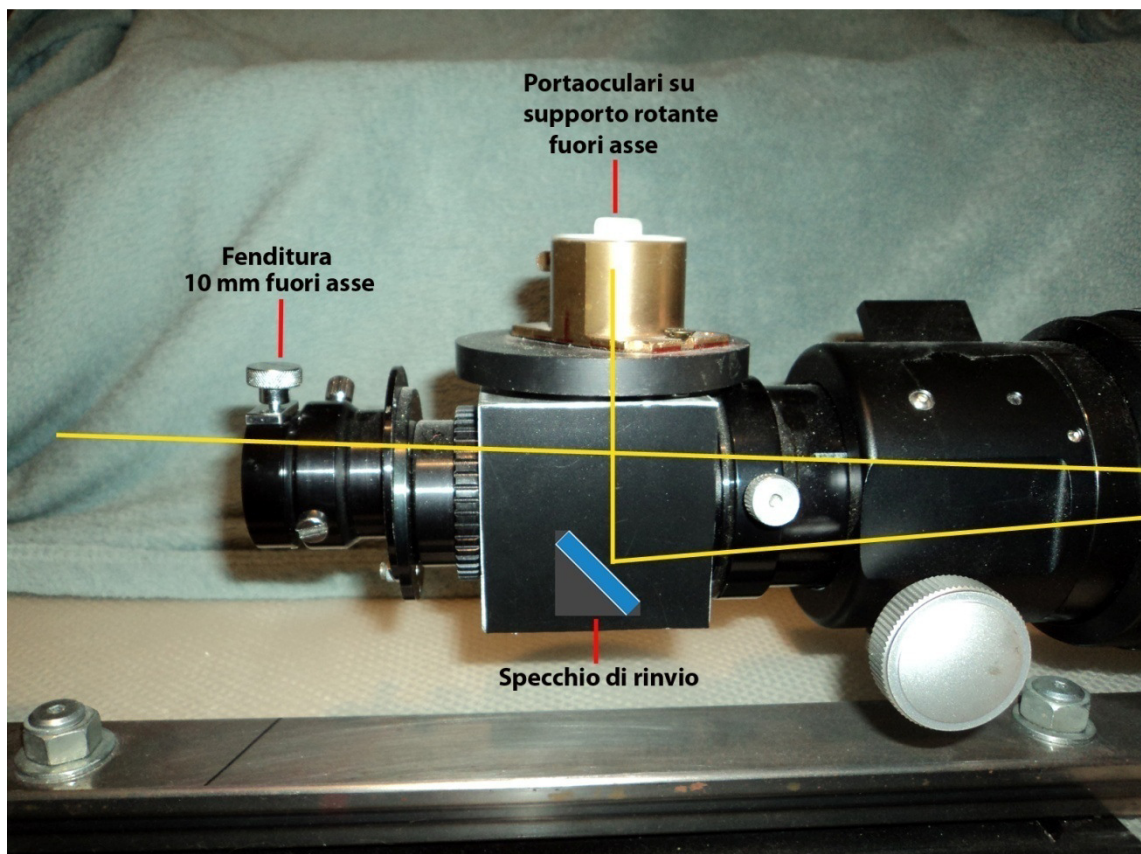
l'alluminio, purchè sia liscio e scorrevole: una volta reso solidale all'asse stesso stringendo la vite di frizione, viene comandato da una vite con una molla di recupero del gioco. E' un sistema che può sembrare rozzo, ma funziona perfettamente.



Come si vede, avvitando la vite di frizione, il braccetto diviene solidale con l'asse e la rotazione di quest'ultimo in un senso o l'altro viene comandata da una vite con manopola e da una molla di recupero.

5- La scatola di rinvio

Anche questo è un componente importante dello strumento. In alcuni casi può essere conveniente adattare una guida fuori asse rinvenibile anche sul mercato dell'usato a prezzi accessibili, possibilmente col prisma mobile e di adeguate dimensioni. Come box ho usato un pezzo di quadratino di alluminio 60 x 60 x 3 mm di spessore. Questo può essere chiuso ai lati con tappi di chiusura bloccati con viti M3 (in alternativa va bene anche del PVC nero da 1-2 mm incollato). Il box è stato poi forato su tre lati e filettato femmina 42 x 0.75 per permettere, come si osserva nella figura, l'attacco del porta oculari da 31.8 della fenditura, di quello dell'oculare e della camera e quindi l'attacco al foceggiatore del tubo ottico dello spettroscopio con un adattatore maschio 42 x 0.75/ 50.8 mm disponibile in commercio.

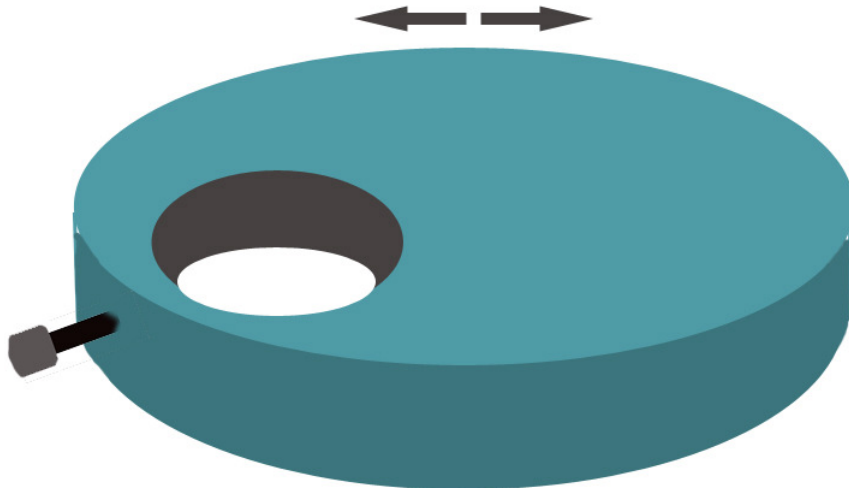


Nella figura sopra si osserva anche che il porta oculari della fenditura è posto fuori asse rispetto all'asse del tubo ottico. Una delle caratteristiche di VHIRSS e di POSS2 rispetto agli altri spettroscopi Hires da me auto costruiti è il posizionamento della fenditura fuori asse ottico. Questa variazione fu dettata dall'intuizione che un angolo maggiore potesse consentire una risoluzione migliore. Ora, il dislocamento del centro della fenditura rispetto all'asse ottico è stato di 10 mm circa, pari a poco più di 1 grado sul piano del reticolo. Dalla pratica sul campo dello strumento sembrerebbe confermato che tale dislocamento possa apportare un miglioramento nella risoluzione e nell'immagine finale, anche per il contenimento dei riflessi interni.

Lo specchietto di rinvio che reindirizza verso la camera il fascio luminoso di ritorno proveniente dal reticolo e dall'obiettivo (spettro) dovrebbe avere una misura pari al campo di piena luce dell'obiettivo (nel mio caso un 80/600) necessario per coprire al punto di fuoco il sensore della camera in diagonale, misurato ad una distanza di circa 70 mm prima del fuoco stesso, ovvero a 530 mm dall'ottica. Tenuto conto che il più grande dei sensori citati misura 15.8 mm in diagonale (quello della ZWO ASI 183), una dimensione dello specchietto di 20 x 20 mm sarebbe sufficiente nell'esempio citato. Occorre tuttavia, nella scelta di tale specchietto, prestare attenzione che abbia una lunghezza tale che, quando posto a 45°, non vada ad interferire con il fascio luminoso in entrata dalla fenditura. Naturalmente al posto di uno specchietto alluminato può essere usato anche un prisma di adeguate dimensioni.

A proposito di montaggio, la cella dello specchio o del prisma dovrebbe essere a rigor di logica montata in modo tale da consentire la regolazione del fascio ottico su tre punti a 120°, similmente alle celle dei diagonali newton: tuttavia nella pratica ho notato che tale regolazione, che comunque complica non poco il montaggio, non è assolutamente necessaria e comunque può essere parzialmente sostituita da una regolazione a 120° nel porta oculari della camera.

Altra caratteristica particolare dello strumento è il porta oculari da 31.8 fuori asse rotante, che permette di centrare la riga di interesse anche se lo spettro, come è noto, si sposta lungo il proprio asse al variare della lunghezza d'onda causa piccole imperfezioni dei solchi del reticolo e/o al suo posizionamento nella cella. Un'alternativa a detto sistema potrebbe essere quello di fare una cella del reticolo regolabile con 3 viti a 120° e quindi lievemente decentrabile e orientabile, tuttavia tale sistema non mi entusiasma per il sospetto che un reticolo posto obliquamente rispetto all'ottica del collimatore possa produrre aberrazioni di coma ed astigmatismo nello spettro.



Il portaoculare rotante con foro da 31.8 fuori asse

E' bene precisare che, nel caso non si opti per la soluzione della fenditura fuori asse, il box con la fenditura ed il porta oculare per la camera può essere vantaggiosamente sostituito con una buona guida fuori asse (Off Axis Guide), montandola tuttavia in modo che il prisma sia rivolto verso il reticolo, anziché verso il telescopio.

Una di queste, particolarmente adatta a tale scopo e della quale possiedo due esemplari, ha il pregio di poter estrarre il grande prisma a piacere, in modo da poterlo posizionare nel punto migliore, nonché di estrarlo completamente e, come necessario nel nostro caso, rivolgerlo dalla parte opposta. Necessita tuttavia, di anelli di raccordo e, ovviamente, di un attacco maschio da 50.8 mm per poter entrare nel porta oculare della messa a fuoco dell'ottica dello spettroscopio (vedi figura). Naturalmente può in linea di principio essere usata qualsiasi guida fuori asse, purché abbia, come si è visto, un prisma di dimensioni adeguate al fascio ottico che va ad intercettare ed i necessari raccordi meccanici.



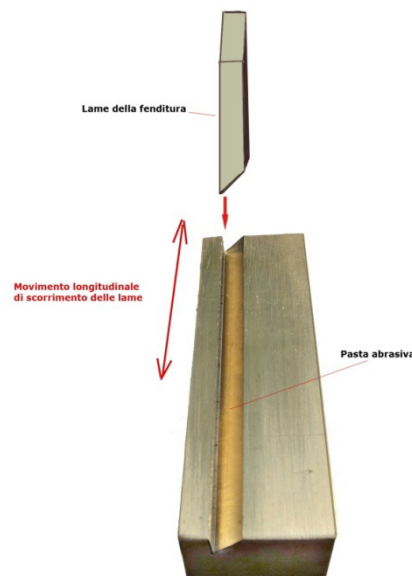
6-La fenditura

Ho lasciato per ultimo il discorso sulla fenditura in quanto tale componente , insieme al reticolo, è quello determinante ai fini della risoluzione del sistema ed alla qualità delle immagini, ed è anche quello più problematico dal punto di vista della lavorazione delle lame e della meccanica generale. Una fenditura degna di tale nome può costare cifre notevoli e non risultare poi adeguata alle esigenze di uno strumento delicato come uno spettroeliografo digitale. Molti consigliano la lavorazione delle lame in proprio, ma questo non è affatto facile senza possedere e saper usare una officina meccanica con frese e macchine di smeriglio. Non tutte le officine meccaniche di precisione, inoltre, sono in grado di lavorare le lamine col grado di precisione richiesta, che è quella della lavorazione degli specchi astronomici ($1/4$ di λ) od almeno che si avvicini a questa.

Per VHIRSS io ho adottato una soluzione ibrida, ovvero quella di acquistare una fenditura commerciale a basso costo e di migliorare la rifinitura delle lame in proprio.

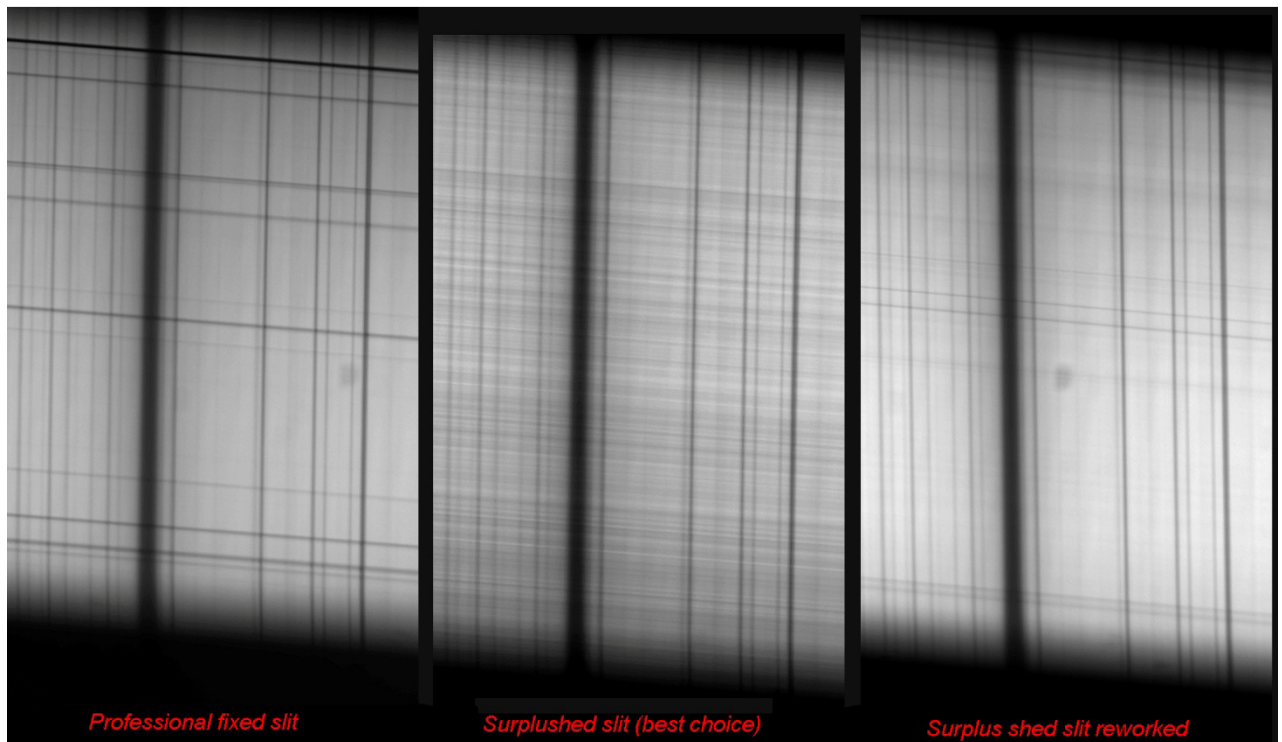
La fenditura è quella di produzione Indiana e commercializzata dalla ditta USA Surplused

<https://www.surplused.com/pages/item/m1570D.html>. Essa è stata smontata e le lame controllate al microscopio a 400 X, dopodiché i bordi delle stesse sono stati lavorati facendoli passare su di un attrezzo in ottone appositamente realizzato, con un incavo femmina simile al maschio della fenditura interponendo pasta abrasiva da carrozzieri. Dopo alcune passate, a forza media, il miglioramento era evidente anche al microscopio, e sono state rimontate.



Ovviamente il lavoro di rifinitura delle lame può essere effettuato anche senza l'attrezzo mostrato, che in pratica funge da guida, inclinando le lame opportunamente su una superficie perfettamente liscia di plastica dura o, meglio, di vetro, interponendo la pasta abrasiva per carrozzieri, se non si possiede l'ossido di cerio.

Qui di seguito il confronto di tale fenditura modificata (l'ultima a destra) con una delle migliori di SurplusShed (al centro) e con una professionale fissa (ultima a sinistra) su uno spettro della riga H α , che ha confermato l'utilità della lavorazione effettuata: le righe orizzontali del trasversalium sono infatti quasi completamente sparite e lo spettro risulta più inciso. Tutto ciò ovviamente a parità di apertura delle lame.



La novità dell'ultimo periodo, come si è detto, è stata l'idea di un astrofilo inglese appassionato di spettroeliografia, Douglas Smith, di creare una fenditura fissa su un sottile strato di ossido di cromo su una base di quarzo fuso, il tutto fissato su un anello di rame da 25 mm.

Chi scrive ne possiede due, e svolgono in modo eccellente il loro compito, assicurando una perfetta uniformità del flusso luminoso tra centro e bordi, tuttavia, essendo opportuno l'uso di un filtro che elimini la radiazione IR, e non volendo inserire in VHIRSS alcun filtro nel percorso ottico, ho optato per la predetta fenditura a lame di ottone, da me modificata.

Altre fenditure su supporto di vetro da 10 micron sono commercializzate dalla ditta francese di strumenti per la spettroscopia Shelyak. <https://www.shelyak.com/produit/se0223a-fente-alpy-uvex-10-%c2%b5m/?lang=en>

Sulla base della mia esperienza con VHIRSS posso dire quanto segue:

-Le fenditure regolabili ad aria sono , per certi versi, equivalenti come resa a quelle al quarzo o in vetro a patto che si possano chiudere ad almeno 10- 15 micron senza eccessivo transversalium e senza perdere il parallelismo tra le lame, cosa purtroppo piuttosto difficile senza interventi meccanici come quello da me effettuato. Relativamente al problema del transversalium, se le righe sono di lieve intensità l'immagine finale non ne risentirà dato che gli ultimi software di conversione, di cui parleremo tra poco, prevedono una routine di eliminazione del transversalium stesso, e comunque , a tale riguardo, le fenditure ad aria presentano un lieve vantaggio rispetto a quelle al quarzo: quello che si possono chiudere al massimo per visualizzare le righe di transversalium sulle quali mettere a fuoco, e poi aprire alla apertura di lavoro. In più, hanno la caratteristica di potere essere regolate a seconda dell'intensità luminosa e del rapporto F/D del telescopio e di essere assolutamente resistenti al calore della luce solare concentrata sulla loro superficie.

Con le fenditure regolabili ad aria di basso costo, tipo quelle del venditore americano Surplused, il problema principale è stato quello dello scarso parallelismo delle lame alla chiusura di lavoro, per cui conviene acquisirne un certo numero e scegliere la migliore dal punto di vista meccanico, sulla quale poi eventualmente intervenire per migliorare i bordi delle lame, come detto in precedenza. Per quanto riguarda le fenditure al quarzo e su vetro , è comunque a mio avviso necessario porre davanti ad esse un filtro UV-IR cut per evitarne il surriscaldamento e la possibile rottura; inoltre queste, per poter regolare il flusso luminoso, specie in caso di rapporti F/D forzati e aperture considerevoli del telescopio che invia la luce solare allo spettroscopio, possono essere usate solo con filtri ND di densità opportuna.

7-L'ottica del telescopio

L'ottica del telescopio di VHIRSS è, come ho detto, un eccellente doppietto di surplus, probabile provenienza militare, pagato a suo tempo la ridicola cifra di 10 € ed intubato nel tubo di un rifrattore Skywatcher 70/500. La messa a fuoco di questo, essendo separato dallo spettroscopio avviene, come può intuirsi, con un sistema a parte, che lo fa scorrere avanti ed indietro sino a che l'immagine del disco solare appare a fuoco sulla fenditura e, cosa più importante Il bordo longitudinale delle spettro inquadrato appare perfettamente inciso sul monitor del PC, cosa fondamentale il quanto

esso sarà il bordo del disco solare nell'immagine finale (spettroeliogramma).

Il sistema di messa a fuoco da me usato con VHIRSS è un sistema micrometrico per macrofotografia acquistato su Amazon a circa 20 € (ma si trova anche su E Bay). Il rifrattorino con gli anelli è fissato alla parte superiore del fok. Gli anelli servono per mettere il tubo perfettamente in asse con la fenditura; per controllare che ciò avvenga basta trapiantare al centro dell'obiettivo o, se si vuole essere più precisi, fare un adattatore diametro obiettivo/ portaoculari 31.8 ed inserirvi un collimatore laser. Tale possibilità permette anche una verifica complessiva dell'allineamento generale delle ottiche del sistema, con l'avvertenza di usare solo laser a bassa potenza, altrimenti il reticolo potrebbe rovinarsi.



8-La messa a fuoco dello spettroeliografo digitale

La messa a fuoco in uno spettroeliografo a alta risoluzione come VHIRSS consta di due momenti: la messa a fuoco dello spettrografo e quella del telescopio, che vanno regolate sino a che il bordo solare ed i particolari sul disco dello spettroeliogramma non sono entrambi incisi. La messa a fuoco dello spettrografo, va effettuata agendo su quella del rifrattore collimatore del Littrow direttamente sui particolari cromosferici visibili *dentro* la riga di interesse (H alpha, H beta CaIIK e H etc.) ovvero sulle macchie solari, che appaiono come una riga nera più o meno spessa ed intensa a seconda della loro estensione che attraversa longitudinalmente lo spettro. Sovente tuttavia tale approccio è difficoltoso, per cui si può operare sul transversalium prodotto dalla fenditura, mettendo a fuoco su quest'ultimo, con la sicurezza di focheggiare anche sui particolari visibili all'interno delle righe, ovvero, in caso di transversalium non visibile, come detto, sulle macchie solari all'interno della riga.

Occorrerà ovviamente focheggiare anche il telescopio, agendo sulla slitta micrometrica, sino a che l'immagine dello spettro sul monitor del PC sia perfettamente a fuoco nel suo bordo longitudinale. In genere si agisce, per tentativi, su entrambi i componenti, spettroscopio e telescopio sino a che si ottiene un'immagine solare ben definita. Io comunque focheggio prima lo spettroscopio e poi il telescopio.

Concludendo, se il transversalium (righe sottili che attraversano longitudinalmente lo spettro) ed il bordo dello spettro sono entrambi a fuoco e netti, la messa a fuoco finale è corretta. In ogni caso il software di ricostruzione più recente permette di ottenere nel giro di pochi secondi l'immagine del sole dal video della scansione per un controllo della focheggiatura.

9-Controlli finali sul corretto assemblaggio dello strumento

Una volta assemblati i vari componenti, prima di passare ad un test sul campo, è opportuno effettuare alcune verifiche.

- Verificare che la fenditura sia posta esattamente sul punto di fuoco del collimatore;

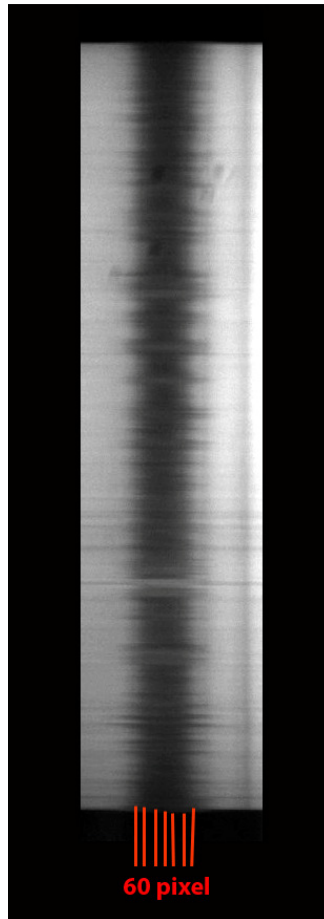
- Verificare che la distanza reticolo- ottica sia la minima possibile;

- Verificare l'allineamento di tutti i componenti (telescopio-fenditura, reticolo, specchio o prisma di rinvio) cosa fattibile, come detto, con un collimatore laser inserito nel paraluce o davanti l'obiettivo del telescopio con un apposito adattatore (è possibile farselo fare o farselo con una stampante 3D con un tondo di PVC di diametro esterno pari a quello interno del paraluce e, al suo centro, un foro da 31.8 per accogliere il collimatore laser a pressione o con una brucola di blocco). In alternativa si può inserire il laser nel portaoculare della camera per effettuare il percorso ottico contrario. Resta l'avvertenza di non usare laser potenti.

Verificare sul campo la funzionalità dello strumento osservando le righe dello spettro solare e mettendo a fuoco sia il telescopio che l'ottica dello spettroscopio. Controllare infine, indoor, con una lampada al Neon od a basso consumo (meglio) la dispersione e risoluzione fornita dallo strumento stesso.

Differenza tra alta e bassa risoluzione spettrale

Ho accennato in precedenza alla differenza tra di strumenti a bassa ed alta risoluzione, ora è il caso di puntualizzare quest'aspetto. Esistono oggi sul mercato, grazie all'evoluzione della spettroscopia astronomica amatoriale degli ultimi anni, vari tipi di spettroscopi, con i quali, a parità di reticolo di alto potere, apertura della fenditura e camera, si possono ottenere buoni spettroeliogrammi, grazie ai software dell'ultima generazione. Tuttavia la focale delle ottiche dello spettroscopio (oltre alle dimensioni del reticolo ed alla bontà della fenditura) gioca a mio avviso un ruolo cruciale nell'ottenimento delle immagini solari in uno spettroeliografo. Ammettiamo quindi di avere, a parità di reticolo, uno spettroscopio con ottiche da 100 mm (littrow o non) e che esso dia, con i pixel di quella data camera (per esempio) un'immagine della riga H alpha di 10 pixel di ampiezza. Il mio VHIRSS, con un ottica da 600 mm, darà, a parità di condizioni, un'immagine spettrale della riga di 60 pixel, quindi 6 volte maggiore. Ora, tenuto conto che il software di conversione può generare, dal video della scansione (passaggio del disco solare sulla fenditura a motori fermi) un'immagine del sole per ciascun pixel lungo la larghezza della riga, nel primo caso otterrò 10 immagini estese a tutta la riga, nel secondo ben 60, che, unite insieme in un processo di stacking potranno dare un risultato migliore. Non solo, ma questo avviene per ciascuna scansione, quindi, se, ad esempio ne effettuo 6, e per ognuna prendo 60 immagini di un pixel alla fine avrò ben 60x6, 360 immagini raw del disco solare di cui fare lo stacking, con risultati molto buoni sotto il profilo sia dell'estetica, sia della quantità di particolari visibili, superiori a quelli dei filtri solari tradizionali per via della strettissima banda passante, pari alla dispersione in Angstrom per pixel (0.02/0.03).



L'importanza della risoluzione spaziale

Naturalmente , oltre alla risoluzione spettrale data dallo spettrografo, anche l'obiettivo del telescopio dà un contributo notevole all'ottenimento dell'immagine finale. Si può immaginare lo spettrografo come un normale filtro H alpha commerciale, ed il telescopio come l'elemento che invia l'immagine solare a quest'ultimo: migliore sarà la qualità ottica ed il diametro del telescopio stesso, migliore sarà la resa dello spettroeliogramma ottenuto. Tuttavia, in uno strumento come quello descritto il diametro dell'obiettivo non dovrebbe superare gli 80 mm e la focale 500 mm , pena l'eccessivo ingombro e peso dello strumento. Per spettrografi di piccole dimensioni si possono usare anche diametri più elevati, in pratica attaccando lo strumento al telescopio, guadagnando così in risoluzione spaziale, ma perdendo in risoluzione spettrale.

Un po' di conti

Al termine di questa discussione sui dettagli costruttivi di strumenti come VHIRSS, qualcuno potrebbe osservare "sì, va bene, molto interessante, ma quanto verrebbe a costare? Probabilmente non tutti gli appassionati di autocostruzione possono permetterselo". La domanda sarebbe legittima, ed il dubbio che la fa porre altrettanto, quindi cercherò di fare il punto, anche se approssimativo, sui costi, distinguendo due casi: quello dell'acquisto di una parte dei componenti sul mercato dell'usato, come nel mio caso, e quello dell'acquisto di ciascuno di essi nuovo, dai commercianti del settore. Il mio VHIRRS è costato circa 600 €, ma acquistando in pratica solo reticolo (nuovo) ed il rifrattore Orion (usato) ed avvalendomi di componenti già in mio possesso, ma non tutti hanno una tale possibilità.

1- Acquisto misto, nuovo ed usato

I componenti dello spettroeliografo acquistabili sul mercato dell'usato sono sicuramente: Le ottiche a rifrazione, come nel mio caso; la fenditura, la scatola di rinvio o, al suo posto, una guida fuori asse.

Quelli da acquistare nuovi sono sicuramente il reticolo e la barra di ferro od acciaio di sostegno della struttura.

In dettaglio, applicando i costi del nuovo e quelli medi dell'usato:

- Rifrattore 66/400 Ed o simili da usare come telescopio (usato).....	200
- Rifrattore SW 80 ED o simili come ottica dello spettroscopio (usato).....	300
- Guida fuori asse (usata).....	100
- Reticolo olografico Edmund 2400 l/mm (nuovo).....	360
- Barra di acciaio da 1 mt 30x30 o simile (nuova).....	10
- Minuteria metallica e piccoli accessori.....	40

Totale.....**€1010**

2 – Acquisto solo nuovo

- Rifrattore 66/400 Ed o simili da usare come telescopio.....	400
- Rifrattore SW 80 ED o simili come ottica dello spettroscopio	500
- Guida fuori asse	200
- Reticolo olografico Edmund 2400 l/mm (nuovo).....	360
- Barra di acciaio da 1 mt 30x30 o simile (nuova).....	10
- Minuteria metallica e piccoli accessori.....	50

Totale..... **1520 €**

Ciò nell'ipotesi che si vogliano usare ottiche ED (che comunque consiglio); nel caso di acquisto di ottiche acromatiche commerciali per lo spettroscopio, per il telescopio o entrambi, i prezzi indicati potrebbero diminuire di un valore tra il 10 ed il 30%, a seconda del tipo e della qualità delle ottiche. Il costo di eventuali filtri accessori non è stato considerato, nell'ipotesi che quasi tutti gli astrofili che si occupano di riprese CCD ne posseggano alcuni.

Facciamo ora una semplice considerazione: con una cifra oscillante sui 1000 € ovvero il costo di un filtro H alpha di bassa fascia si entrerebbe in possesso di uno strumento potenzialmente capace di riprendere il sole non solo in luce H alpha, ma in tutte le lunghezze d'onda degli elementi di un certo interesse (H β , H γ , Na1 e 2, Mg, Fe 1, CaII K e H, etc), ciò senza considerare gli altri utilizzi dello strumento (Spettroscopia solare, misurazione dei campi magnetici solari, spettroeliografia differenziale, etc). La capacità, inoltre di mostrare particolari della cromosfera equivarrebbe a quella di un filtro commerciale triple stack. Uno strumento quindi da torre solare professionale nella propria abitazione od osservatorio.

Ho volutamente trascurato, in questa sede, i dettagli auto costruttivi degli altri miei strumenti, POSS2, un littrow simile a VHIRSS dedicato agli spettroeliogrammi nella zona UV dello spettro (CaII H e K, Cn, Al1 etc) e Solarscan, dedicato alla misura dei campi magnetici solari, per i quali rinvio alla prima edizione di questo mio testo. Per POSS2 inserisco una foto, dalla quali si osserva la sua architettura costruttiva, del tutto simile a quella di VHIRSS. Riguardo a Solarscan, più avanti riporterò un breve aggiornamento sull'attività dello strumento negli ultimi anni.



POSS2

Riporto qui invece le innovazioni e le novità intervenute negli ultimi 4 anni nella mia strumentazione spettroeliografica.

MILSS

Mi sono spesso chiesto se la configurazione Littrow autocollimante fosse stata applicabile anche a spettrografi di piccole dimensioni, così ho cominciato ad elaborare un progetto le cui caratteristiche dovevano essere ispirate alla massima semplicità di costruzione e d'uso mantenendo nel contempo una decisa robustezza e tutte le regolazioni necessarie ad uno strumento serio: niente , quindi, plastica o PVC, ma solo alluminio. L'idea era quella di realizzare uno spettrografo-spettroeliografo ad alta risoluzione di dimensioni di circa 30 cm di lunghezza ed 1,5 kg di peso, facendo semplicemente ricorso al materiale in mio possesso, senza acquistare nulla.

La componente essenziale è stato un reticolo olografico di Edmund Optics da 2400 l/mm da 30 mm di lato, inserito in un semplice quadratino di alluminio di 6 cm di lato da 3 mm di spessore filettato 42x0.75 su tre lati, con una manopola per la rotazione del reticolo stesso sul proprio asse. Il posizionamento micrometrico del reticolo stesso è assicurato da tre grani da 4 mm posti a 120° sulla manopola di rotazione. Il box di alluminio è collegato ad una altro delle stesse dimensioni e caratteristiche che reca il portaoculare, lo specchietto deviatore e la fenditura. Il portaoculare da 31.8 mm è fuori asse in modo da centrare sempre lo spettro ed ovviare ai piccoli, inevitabili errori di posizionamento dei componenti assemblati in casa ed alla inevitabile differenza di centratura dello spettro a seconda delle lunghezze d'onda. Il collimatore è stato un doppietto acro da 30 mm di diametro e 160 mm di focale derivato da un cercatore 6x30 vintage. Lo specchietto deviatore piano di 20x30 mm è posto sulla base della seconda scatola ed è regolabile con tre viti a 120°. Tra le due scatole è inserito un foccheggiatore elicoidale non rotante da 45 mm di lunghezza e 25 mm di corsa.

Come fenditura ho usato una fenditura fissa da 9 micron litografata al cromo su un supporto di quarzo.

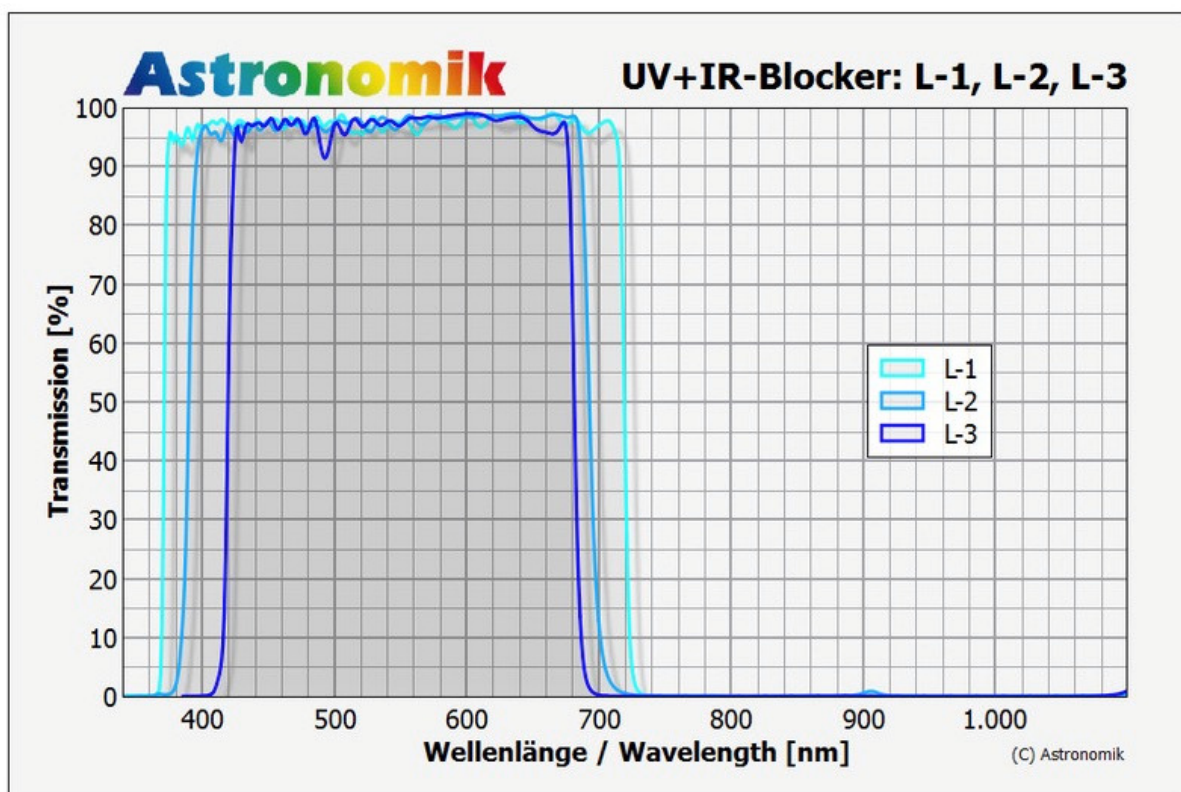
Il tutto in uno piccolo strumento da 30 cm di lunghezza e 1,2 Kg di peso. Esso è stato posizionato nel senso dell'altezza per motivi di collimazione delle ottiche, in modo che lo specchio deviatore è perpendicolare al reticolo ed al portaoculari, e riceve il fascio luminoso per il reticolo dalla fenditura posta a 90°.

Il risultato è stato più che soddisfacente, lo spettrografo stand alone ha fornito una dispersione di 0.057 Å/pixel con pixel da 4.65 micron della mia DMK 51 a 5890 Å ed una risoluzione $R = 33600$ a 5884 Å, valori di tutto rispetto per uno strumentino del genere.

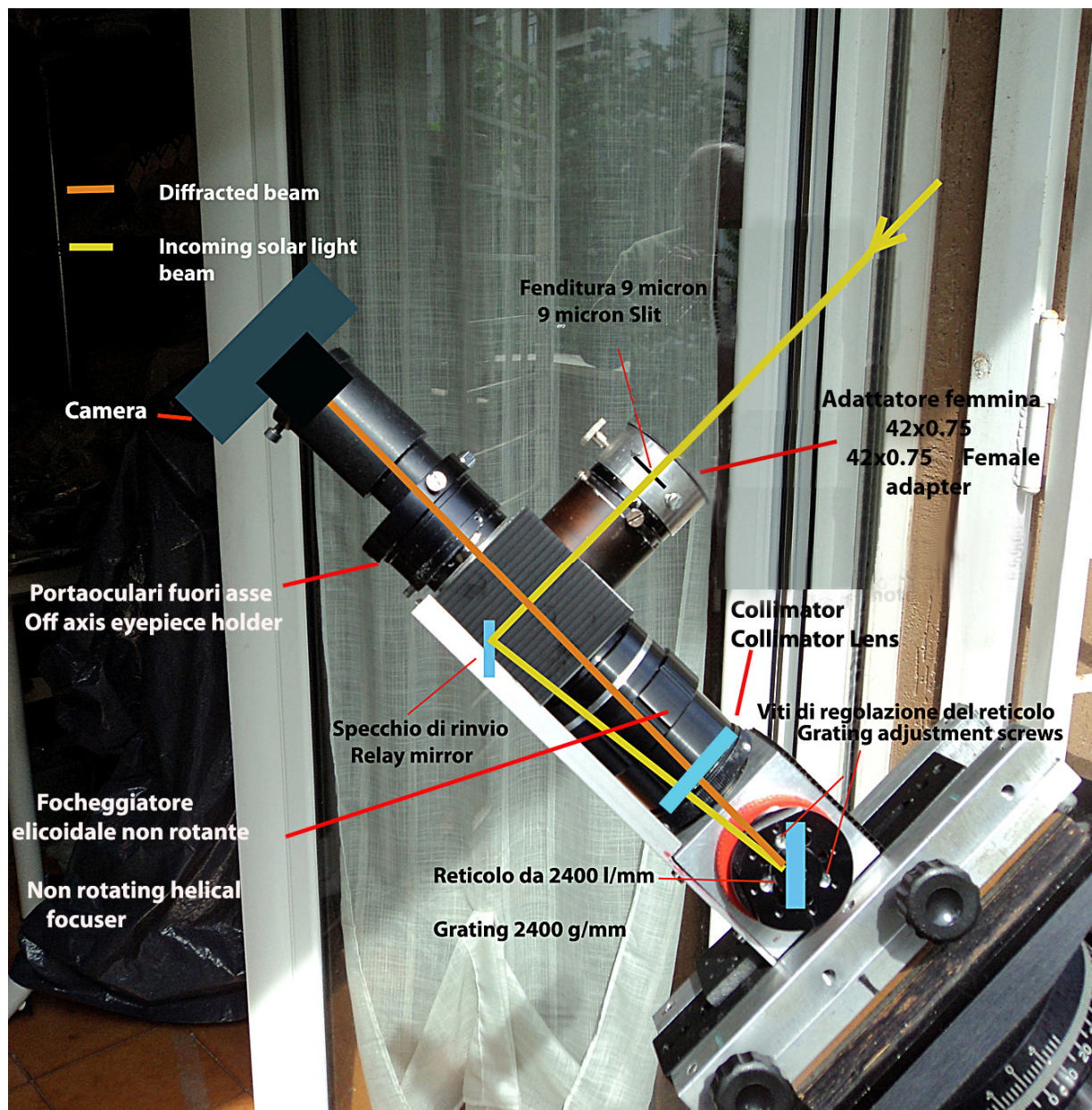
L'ho denominato MILSS, acronimo di **MI**ni **L**ittrow **S**olar **S**pectrograph-spectroheliograph.

Il layout del solo spettrografo è riportato nell'immagine che segue, mentre la sua piccola dimensione e peso permettono di applicarlo a qualsiasi telescopio rifrattore od anche catadiottrico, purchè dotato di un mezzo di filtraggio del calore solare.

Può essere usato, a tale riguardo, un filtro Astronomik IR UV cut L1, che possiede una banda passante in grado di arrivare alle righe del Calcio ionizzato CaII K e H, e anche più in profondità, per eventuali altre righe dell'UV vicino.



Nell'immagine il Layout di MILSS

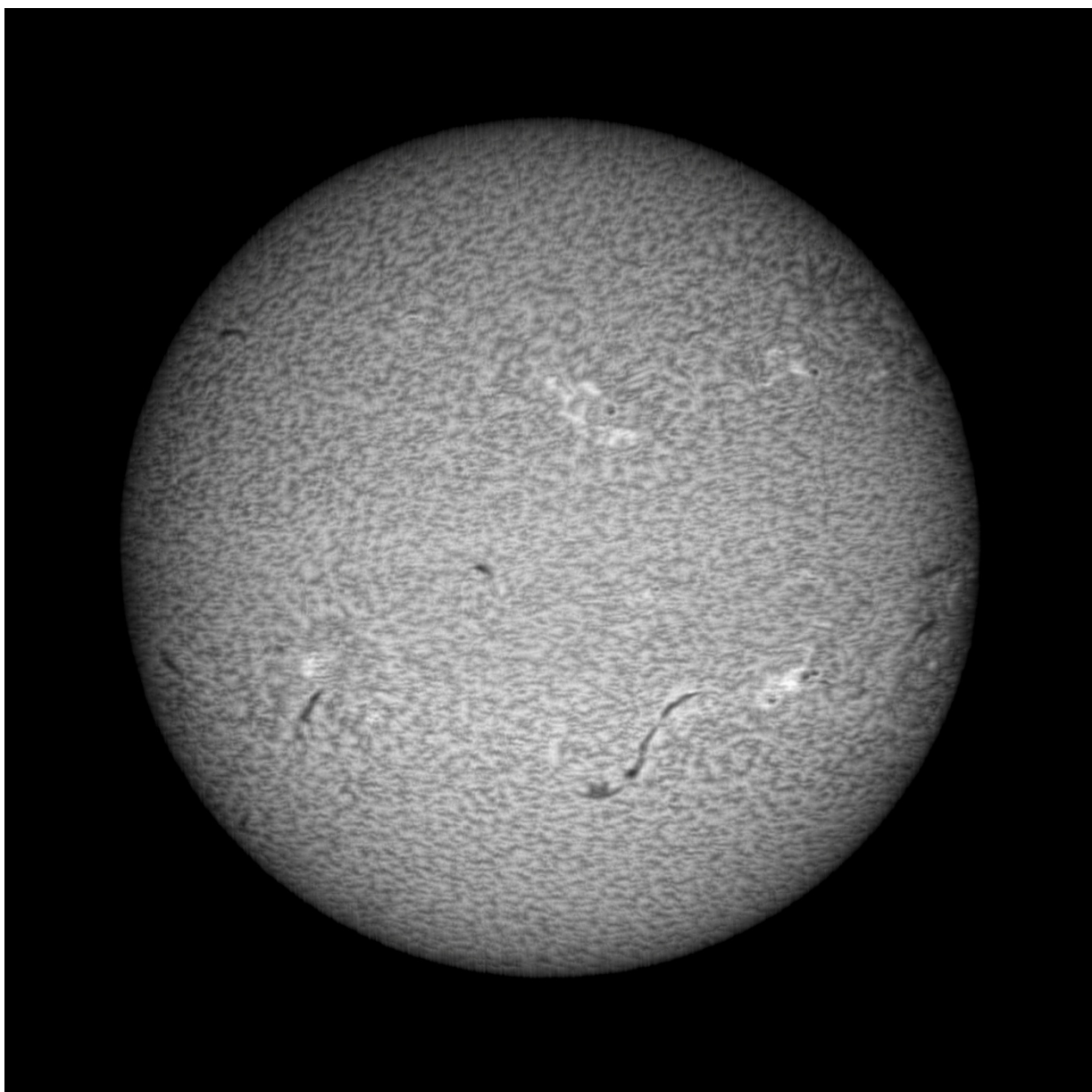


Nella figura che segue, la resa dello spettrografo sul doppietto del sodio a 5889.75 Å, con una dispersione di 0.057 Å /pixel ed una risoluzione di 33.622 a 5884 Å, valori di tutto rispetto per il tipo di strumento.



Di seguito un'immagine di MILSS al fuoco di un rifrattore apo Tecnosky 80/560 per l'uso come spettroeliografo digitale. Ed il suo primo spettroeliogramma H alpha.





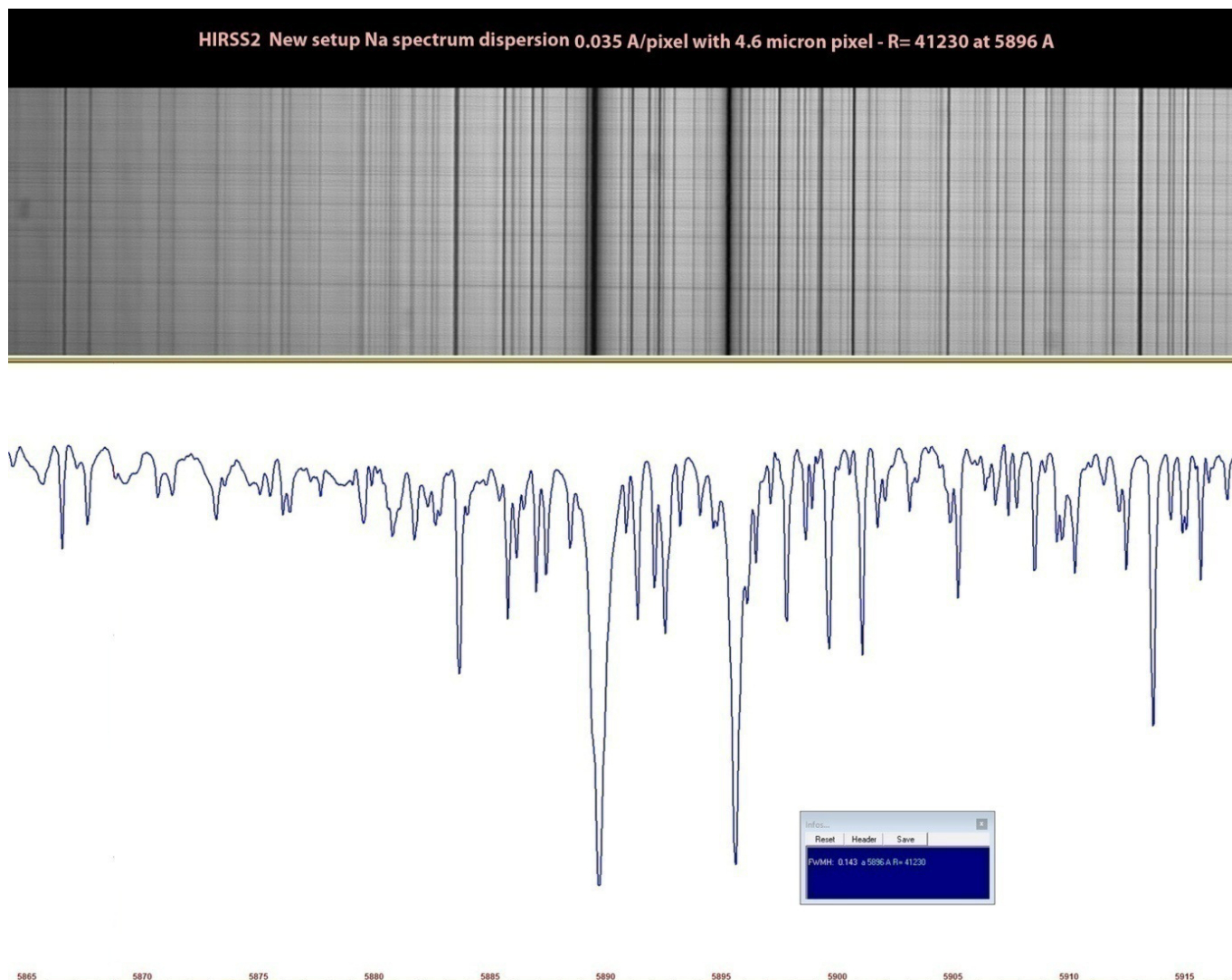
Upgrade di HIRSS2

Nell'ultimo periodo ho deciso di dare un nuovo utilizzo al mio spettrografo HIRSS2 (uno dei 4 ad alta risoluzione autocostruiti in mio possesso). Avevo infatti acquistato qualche tempo fa ad una cifra ridicola (60 €) un rifrattore apo William Optics 90/600, che presentava una scheggiatura di 5 mm sul bordo della lente frontale. Coperta la scheggiatura col pennarello nero indelebile, lo strumento si presentava performante, quanto bastava per sostituire il vecchio acro Antares 100/500 che utilizzavo come ottica dello spettroscopio autocollimante. Ho dovuto tuttavia montare anche un nuovo foccheggiatore, un vecchio, ma molto preciso e robusto elicoide non

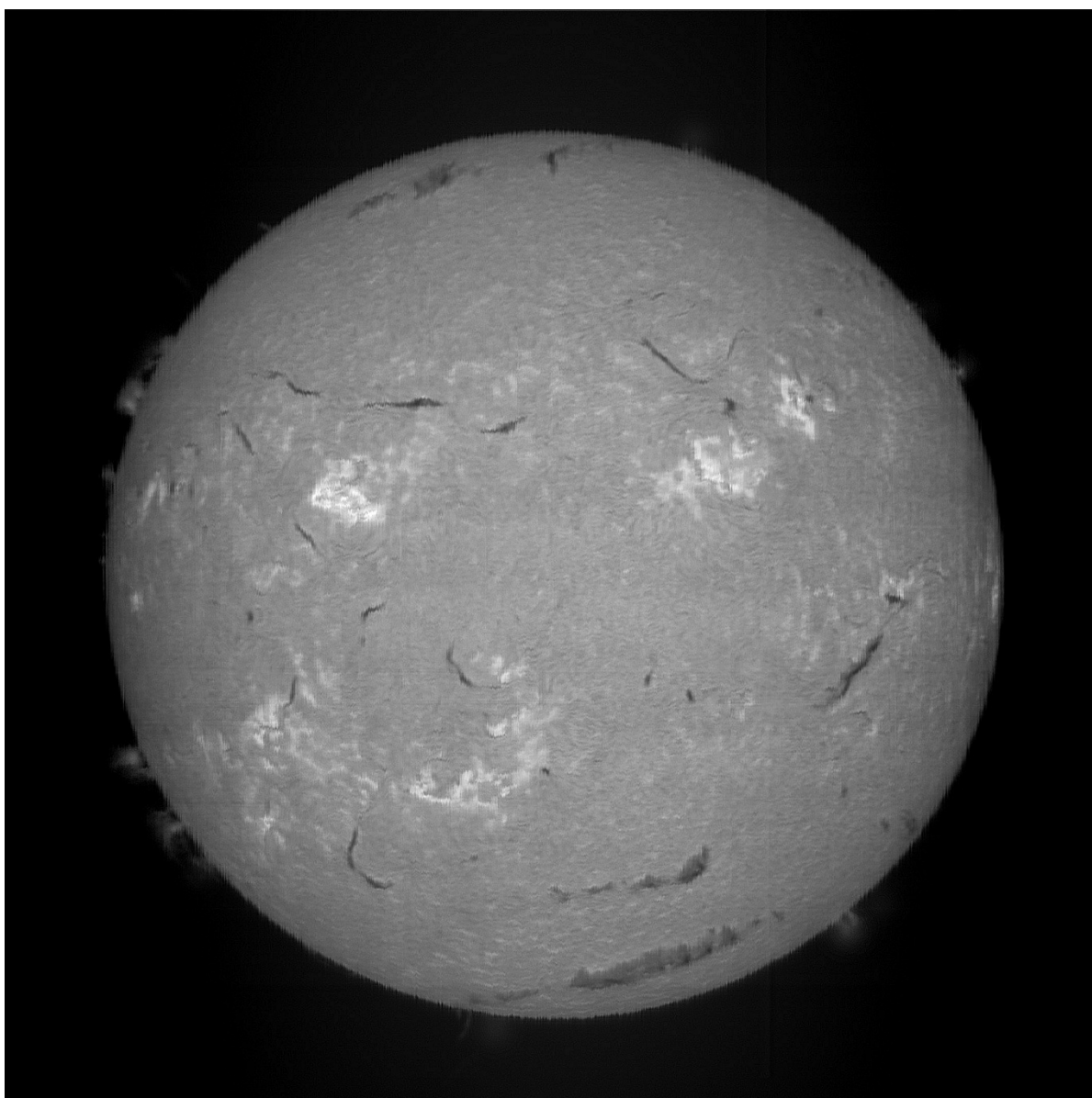
rotante in grado di apprezzare 1/10 di mm. Il telescopio utilizzato è ora, al posto del vecchio rifrattore acro vintage 60/420, anni 70, un vero e proprio gioiellino, un acromatico 68/600, marcato Mizar, anch'esso dello stesso periodo e di produzione giapponese. Questo eccellente rifrattore non ha sfigurato, da prove fatte, nel confronto con l'apo ED da 90 mm che ho usato per lo spettrografo.

Dal test effettuato sullo spettro del doppietto del sodio con una camera DMK 51, la dispersione è stata 0.035 Å/pixel e la risoluzione R di 41230 a 5896 Å. Sono quindi passato ad utilizzarlo come spettroeliografo digitale con una ripresa H-alpha, utilizzando una ZWO ASI 183 MM ed il software Firecapture per l'acquisizione, mentre per la conversione dei file video SER ho utilizzato INTI Avi recon 3.7. La prima prova di spettroeliografia (effettuata ancora col vecchio rifrattore 60/420 mi ha abbastanza soddisfatto, me penso ci sia ancora ulteriore margine per miglioramenti. Di seguito il Layout di HIRSS (**HI** Resolution **S**olar **S**pectroheliograph)², simile a VHIRSS e POSS2, con l'unica differenza di avere la fenditura sull'asse ottico.





Lo spettro bidimensionale ed il profilo spettrale del doppietto del sodio a 5890 A con la dispersione di 0.035 A/pixel coi pixel da 2.4 micron della ZWO ASI 183 m ed una risoluzione , misurata sul campo, di R 41230 a 5896 A.



Lo spettroeliogramma H alpha ottenuto con HIRSS2 e la ZWO ASI 183

Lo strumento, come si è visto, ha buone prestazioni, ma , purtuttavia un pizzico inferiori a quelle VHIRSS, nonostante l'uso di una camera con dinamica a 16 bit e pixel di dimensioni pari alla metà di quelli della DMK 51 , che uso col predetto spettrografo.

Mi sono chiesto allora il perché, dato che le ottiche impiegate per lo spettrografo ed il telescopio era simile sia per qualità che per focale e diametro. L'unica differenza di HIRSS2 rispetto a VHIRSS, oltre che dal tipo di reticolo, da 1800 l/mm ruled, con angolo di blaze (inclinazione delle incisioni) per 500 nm è data dalla posizione della fenditura , sull'asse ottico , mentre in VHIRSS è fuori asse ottico e di circa 10 mm sopra questo.

E' necessario a questo punto fare una premessa.

Nella configurazione Littrow o autocollimante , come si è detto, esiste una sola ottica che agisce contemporaneamente da ottica di collimazione e della camera. In essa il raggio luminoso incidente e diffratto hanno lo stesso angolo, in quanto la luce fa un doppio passaggio prima di raggiungere il sensore, e questo angolo è l'angolo di "blaze" del reticolo ovvero l'angolo delle incisioni del reticolo per i reticoli incisi o "ruled". Per quanto riguarda invece i reticoli olografici non blazer (con solchi smussati), considerato che gli stessi convogliano il massimo dell'energia luminosa verso l'ordine 0, si considera un angolo di blaze pari a 0. Nella configurazione Littrow inoltre il fattore anamorfico, ovvero il rapporto tra l'angolo del raggio in uscita diffratto e quello in entrata vale 1, ovvero l'angolo è lo stesso. E' stato quindi per pura intuizione che ho cercato di aumentare fisicamente l'angolo di ingresso del raggio luminoso nello spettrografo, nella speranza di illuminare meglio il reticolo ed aumentare la risoluzione spettrale. Tale risultato sembra essere stato ottenuto, senza tuttavia, riuscire a far diminuire la luce diffusa che è l'unica caratteristica negativa delle configurazioni Littrow e che dipende da piccole irregolarità del reticolo, ma anche dalla posizione relativa fenditura-ottiche-reticolo e dai relativi angoli di incidenza. Tale inconveniente potrebbe essere eliminato con il posizionamento di diaframmi nel percorso ottico che tuttavia, date le misure molto ristrette in gioco, risulta molto difficile su progetti non professionali. Esso è comunque controllabile con l'uso di filtri di banda posti possibilmente prima della fenditura o dopo di essa. Nel caso di VHIRSS e POSS2 non produce alcun decadimento prestazionale dato che tali spettroeliografi vengono usati in bande spettrali come l'H alpha e l'Uv vicino nelle quali l'efficienza quantica delle camere , CCD o CMOS è modesta. La questione è valsa comunque ad attrarre la mia attenzione sull'importanza della posizione della fenditura di ingresso negli spettroграфи Littrow.

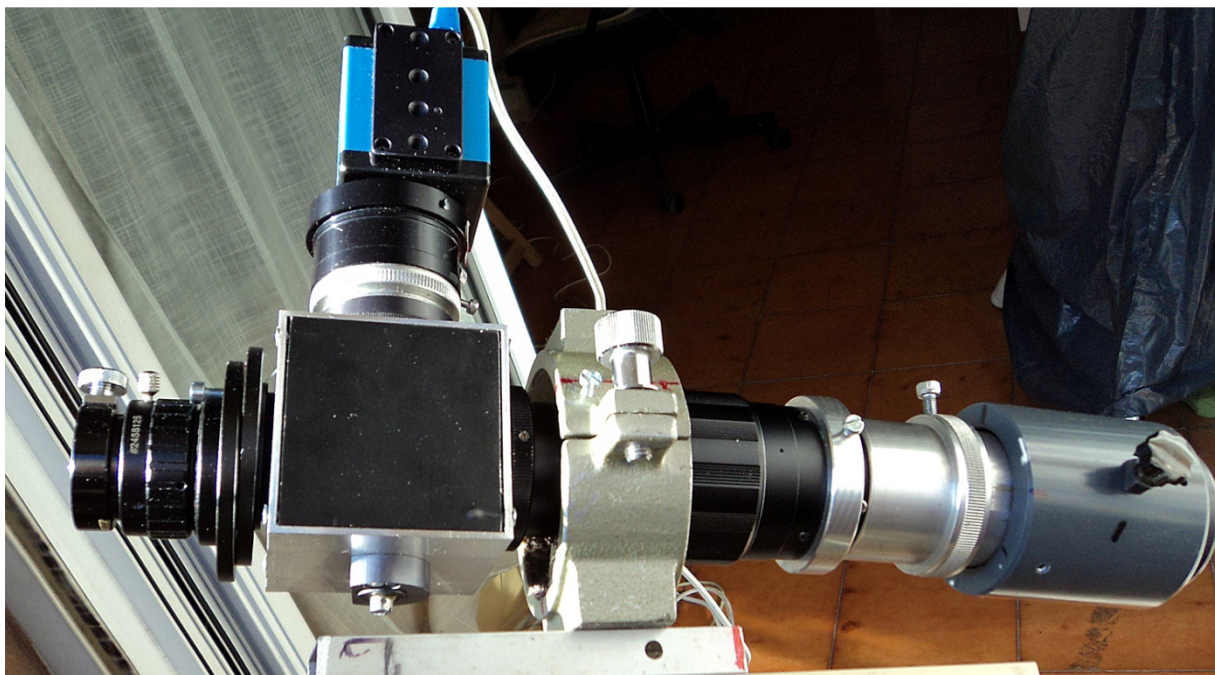
Upgrade di UPS (Ultra Portable Spectroheliograph)

Avevo pensato, nell'ultimo periodo, di dedicare tale strumento alle riprese in luce H beta a 4861 Å e H gamma a 4340 Å., zone spettrali in cui l'EQ dei sensori è elevata. Mi sono accorto che, con la fenditura originaria sull'asse ottico, le immagini presentavano dei gradienti

dovuti ad infiltrazioni di luce e/o luce diffusa. Ho pensato quindi di disassemblare lo spettrografo per scoprirne la causa. Ora, l'ottica (di surplus) di UPS è un doppietto di 36 mm di diametro e 300 mm di focale, praticamente la metà degli altri miei spettrografi Littrow, con un reticolo olografico di 25 mm di lato e 2400 l/mm e l'allineamento del sistema (fenditura-collimatore-reticolo-specchio di rinvio) nei Littrow di corta focale è piuttosto impegnativo. Quindi ho sudato le classiche sette camicie, ma l'output dello strumento non mi convinceva. Dopo numerosi controlli, tuttavia la situazione non migliorava e lo spettro si presentava non definito e non al centro del campo per disallineamenti tra reticolo, specchio di rinvio e fenditura. Ho quindi agito sulla regolazione dello specchietto di rinvio, ho cercato di mettere meglio in asse il reticolo, ma niente. Mi è allora venuta un'idea, dato che il portaoculare era ruotante e posto fuori asse, perché non fare lo stesso con la fenditura e allineare il tutto regolandoli entrambi?

Detto fatto, ho scelto tra i miei accessori un raccordo filettato maschio/femmina 42 x 0.75 con 3 viti a 120° normalmente usato per regolare l'inclinazione della camera, vi ho aggiunto un portaoculare 31.8, ho allentato le viti in modo che i due dischi del raccordo potessero scorrere su se stessi, ed il portaoculare fuori asse per la fenditura era fatto!

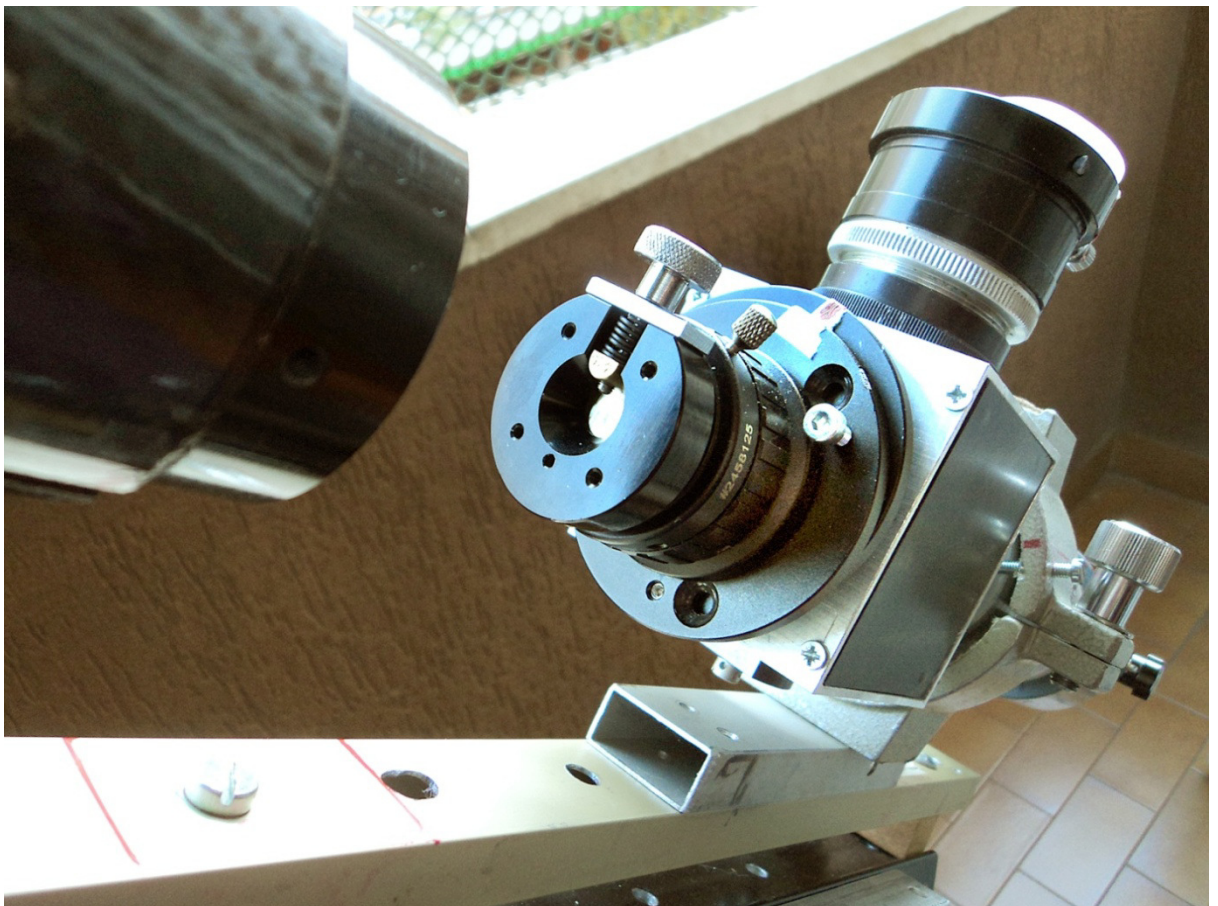
Ho quindi, a tentativi, orientato fenditura e camera sino ad ottenere uno spettro centrato, ben definito e con il minimo di luce diffusa, bloccando poi le due regolazioni.



Lo spettrografo UPS stand alone

Come si osserva nella immagini che seguono, i due componenti fuori asse permettono di:

- 1- Mettere perfettamente in asse reticolo,specchio di rinvio e camera, cosa piuttosto difficile nei Littrow di corta focale assemblati in modo casalingo.
- 2- Controllare e minimizzare la luce diffusa nel sistema,cosa che nel caso in esame, si ottiene posizionando la fenditura fuori asse quasi perpendicolarmente all'asse di rotazione del reticolo, nel punto più lontano dalla camera.

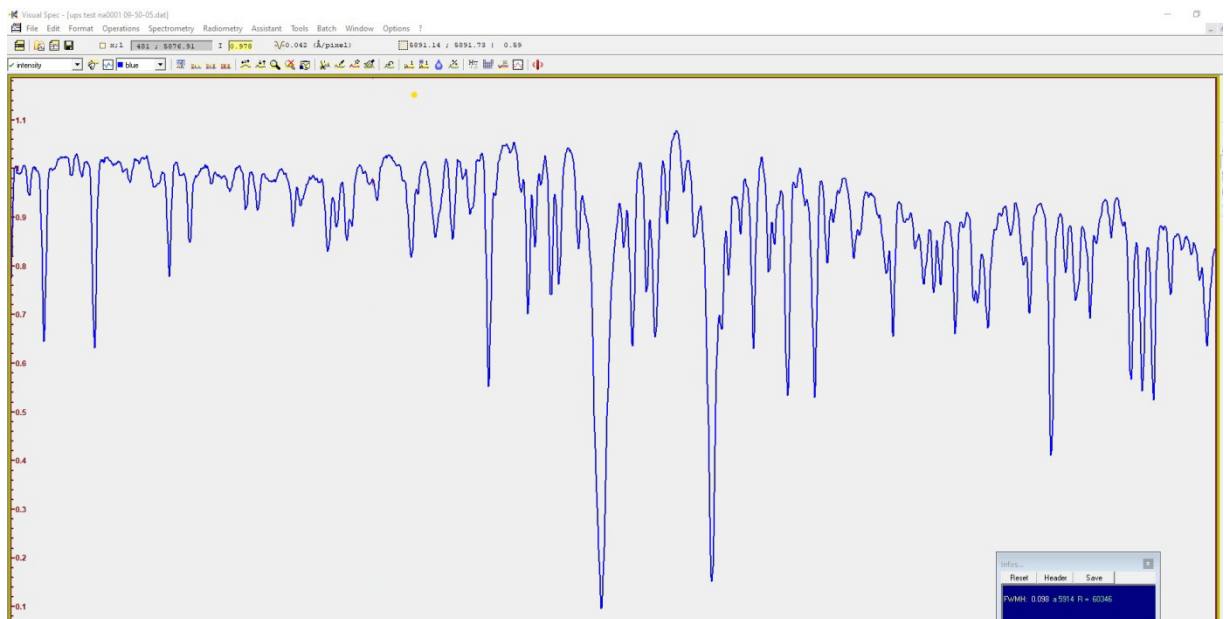


Particolare della fenditura fuori asse



Particolare del portaoculare fuori asse visto da sopra

Così regolato, il Littrow sfoggiava ottime prestazioni, come si osserva nel seguente profilo spettrale del doppietto del sodio a 5890 Å, ottenuto con VisualSpec, con una dispersione di 0.043 Å/pixel con pixel da 4.4 micron.

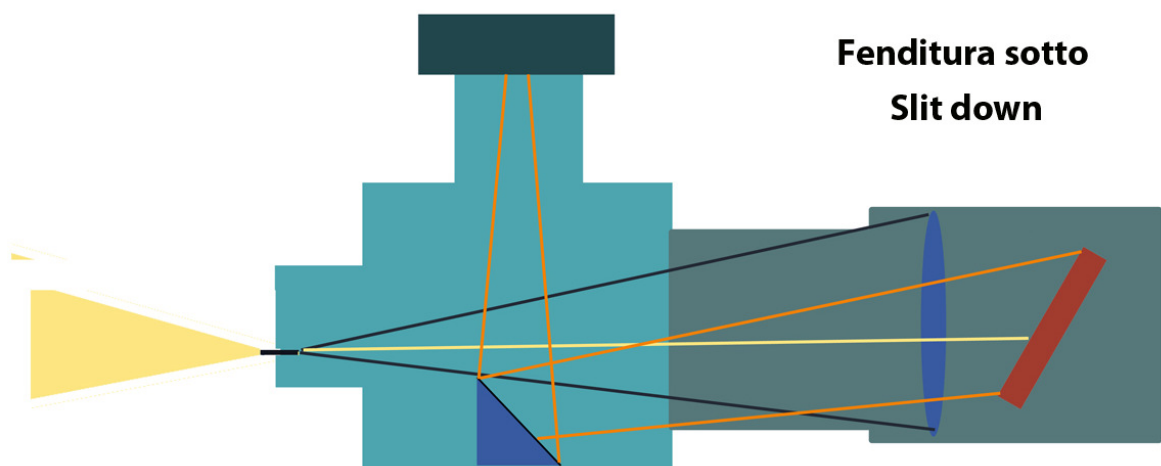
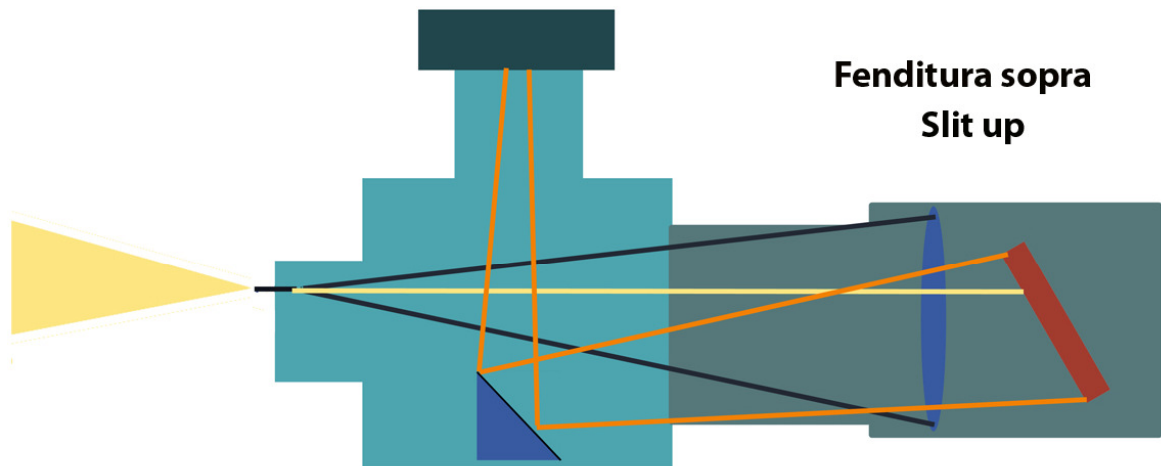
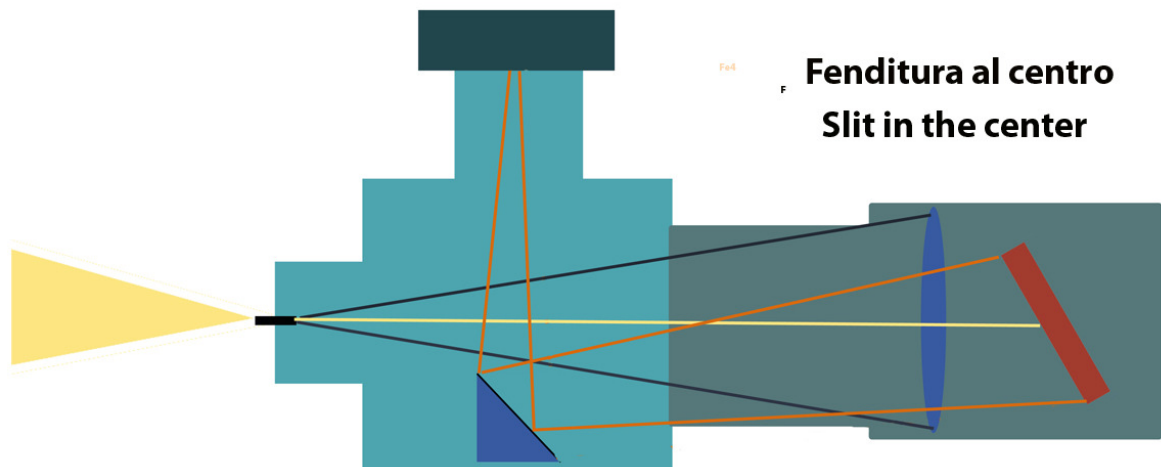


L'allineamento tra fenditura,ottica e reticolo negli spettrografi in configurazione Littrow autocostruiti.

Lo spettrografo costituisce, come si è visto, il cuore di uno spettroeliografo digitale. Negli spettrografi in configurazione Littrow autocostruiti l'allineamento tra fenditura, specchietto o prisma deviatore, ottica e reticolo può sembrare facile, ma non è così. Spesso piccole imperfezioni di assemblaggio dei componenti, specie negli strumenti "fatti in casa" influisce sulla collimazione dei vari componenti. Un sistema per ovviare a tale situazione è quello di porre sia fenditura che portaoculari della camera fuori asse, in modo che la loro posizione sia regolabile. Ciò vale ancor di più per gli strumenti, come quelli ad alta risoluzione e lunga focale nei quali lo spettro è molto lungo e si sposta lievemente, per piccole imperfezioni del reticolo od altro a seconda della lunghezza d'onda. L'accorgimento descritto permette:

- di regolare la collimazione iniziale tra i componenti dello spettrografo
- di centrare lo spettro nella camera quando ci si sposta in lunghezza d'onda, per es. dalla riga H alpha alla CaIIK.
- di migliorare la luce diffusa e (poco) la risoluzione del sistema allorquando la fenditura è posta in posizione opposta alla direzione del raggio diffratto del reticolo ovvero in alto quando il reticolo inclinato

verso il basso di circa 20-30 ° ed il raggio diffratto punta verso il basso) come per VHIRSS e POSS2 ed il contrario nel caso opposto, come per UPS. Di seguito le posizioni possibili della fenditura.



Possibilità di incremento della risoluzione spettrale nelle configurazioni Littrow.

Dopo aver discusso di alcuni tipi di spettroeliografi, tutti nella configurazione autocollimante Littrow, ritengo di fare cosa utile riportando in questa sede alcuni esperimenti da me portati avanti con il primo modello dello spettroeliografo HIRSS2, del quale ho dianzi illustrato la modifica, relativamente all'incremento della risoluzione spettrale senza modifiche strutturali dello stesso.

Lo strumento, nella sua configurazione dell'epoca, era composto da uno spettroscopio costituito da un rifrattore acro Antares 100/500 e da un reticolo quadrato da 50 mm di lato e 1800 l/mm blazed per 500 nm: la fenditura usata era quella in vendita presso SurplusShed. Il telescopio che illuminava la fenditura, con luce solare od altro, era un obiettivo acro Carl Zeiss Jena 62/420. La camera usata è stata una DMK 51 AS. Per ciascun spettro del sole è stato registrato un filmato AVI di 700 frames mediati con Registax. I profili spettrali e le relative misurazioni sono stati ottenuti con il software Visual Spec di Valerie Desnoux.

Partendo dall'ipotesi che una lente di barlow aumenta la focale del telescopio cui viene applicata e che crea un'immagine virtuale ingrandita della fenditura sia nel senso della lunghezza che della larghezza, si sono interposte due lenti di barlow GSO, una 2X ed una 5X tra l'ottica dello spettroscopio e la fenditura, a breve distanza dalla fenditura stessa, mantenendo in tutti i casi la sua chiusura a circa 30 micron. Si sono quindi ripresi spettri della luce solare nelle zone del sodio e della riga H alfa dell'Idrogeno. Il risultato, misurato sulla FWHM della riga più sottile con Visual Spec, è stato il seguente:

Barlow 2 X e 5X

Zona Sodio

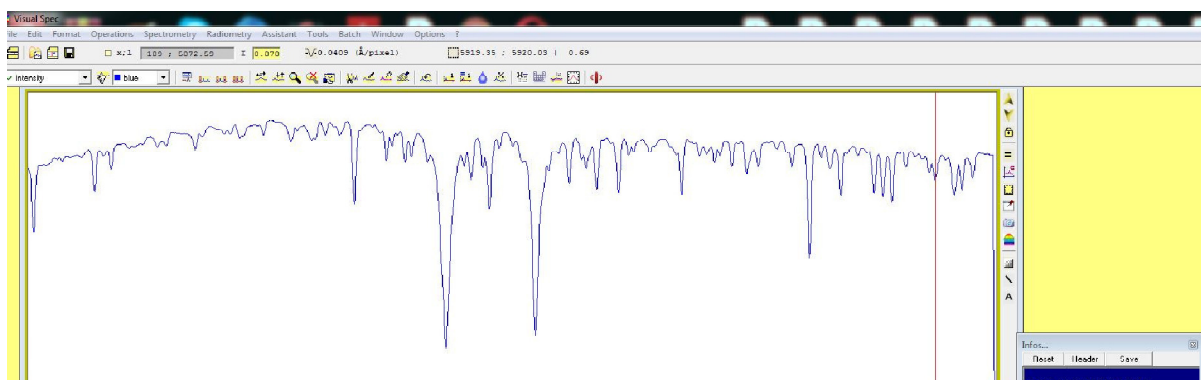
1) Senza barlow od altri aggiuntivi ottici: a λ 5883.73 A **R= 20572**

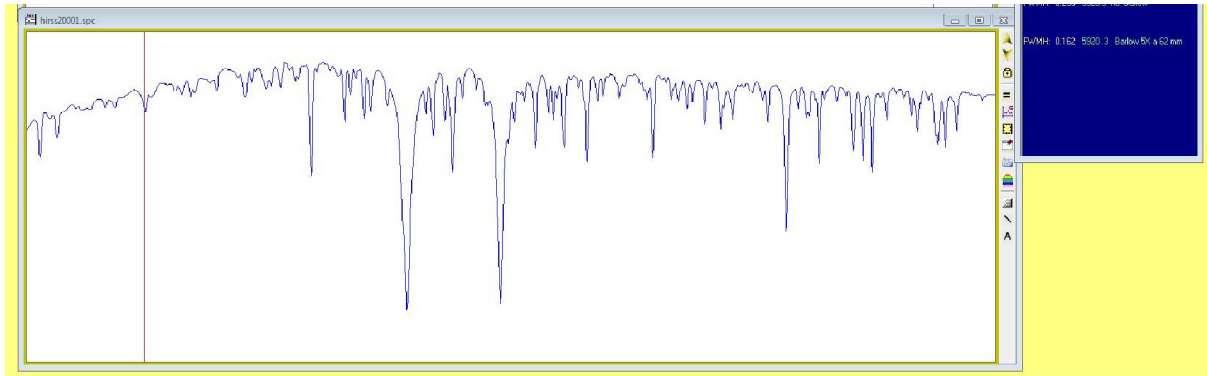
2) Con **Barlow 2X** a **57 mm** dalla fenditura vs l'ottica
a 5883.73 A **R=25806** +27%

3) Con **Barlow 5X** inserita tra fenditura e l'ottica dello spettrografo ed
il reticolo: a **15 mm** dalla fenditura stessa
a λ 5884.17 A **R= 34411** +69%

4) **Barlow 5X** inserita tra fenditura e l'ottica dello spettrografo (ed il
reticolo) a **62 mm** dalla fenditura:
a λ 5920.3 A **R= 36545** +75.6%

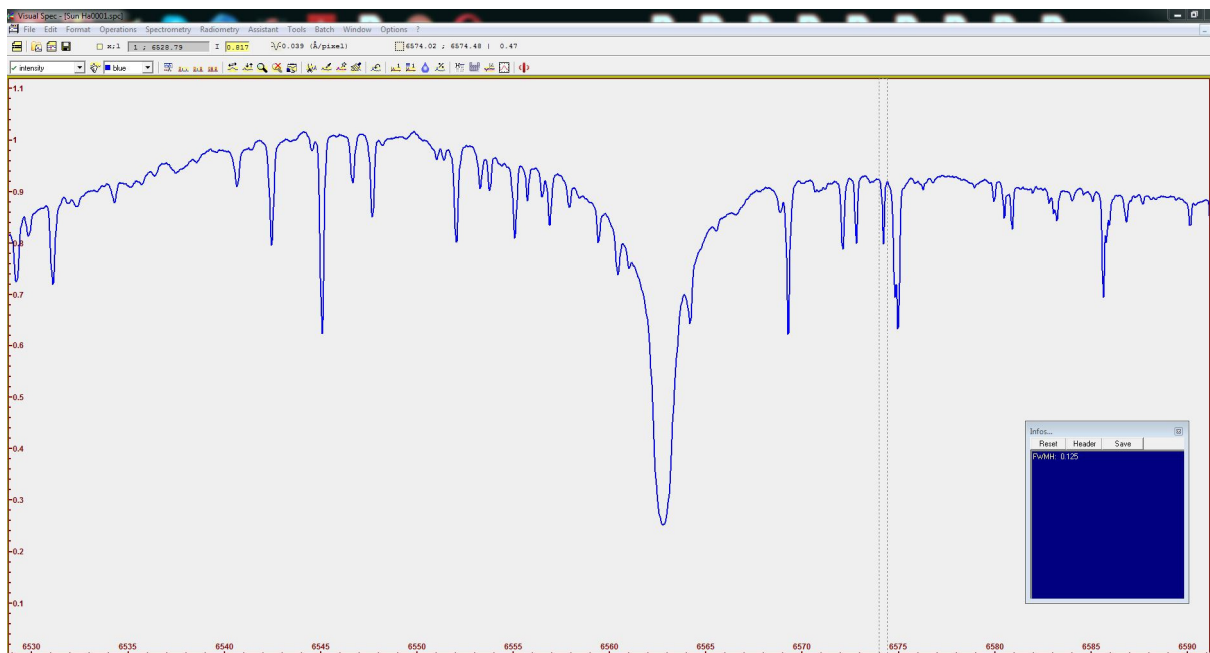
Nell'immagine che segue e mostrato il confronto tra il profilo spettrale nella zona del doppietto del sodio senza aggiuntivi ottici e con la barlow 5X: la differenza e apprezzabile anche a occhio, nonostante la bassa risoluzione dell'immagine.





Nella zona H alpha, sempre nella stessa configurazione, (Barlow 5X a 62 mm) si ha, come mostrato nella figura che segue:

a λ 6574.3 Å **R= 52594**



Con Lente cilindrica da 25 mm FL

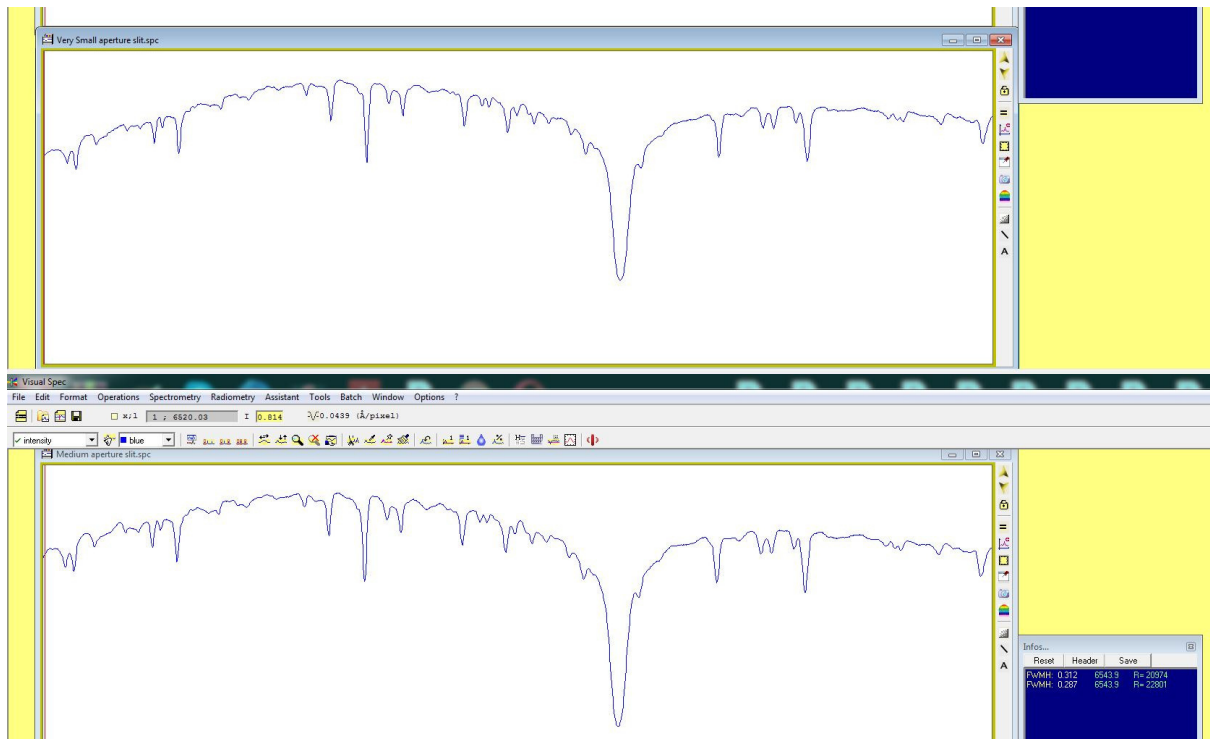
1) Con lente cilindrica da 25 mm FL a 52 mm dalla fenditura

Zona H alpha

La risoluzione in zona H alpha è stata pari o leggermente inferiore a quella normale con una chiusura di 30 micron e migliora di poco chiudendo al massimo possibile la fenditura, (**da R= 20900 a R= 22800**) ma la cosa interessante è la quasi totale eliminazione del transversalium, anche a fenditura quasi completamente chiusa, (10-15 micron) come si osserva nell'immagine della riga H alpha che segue.

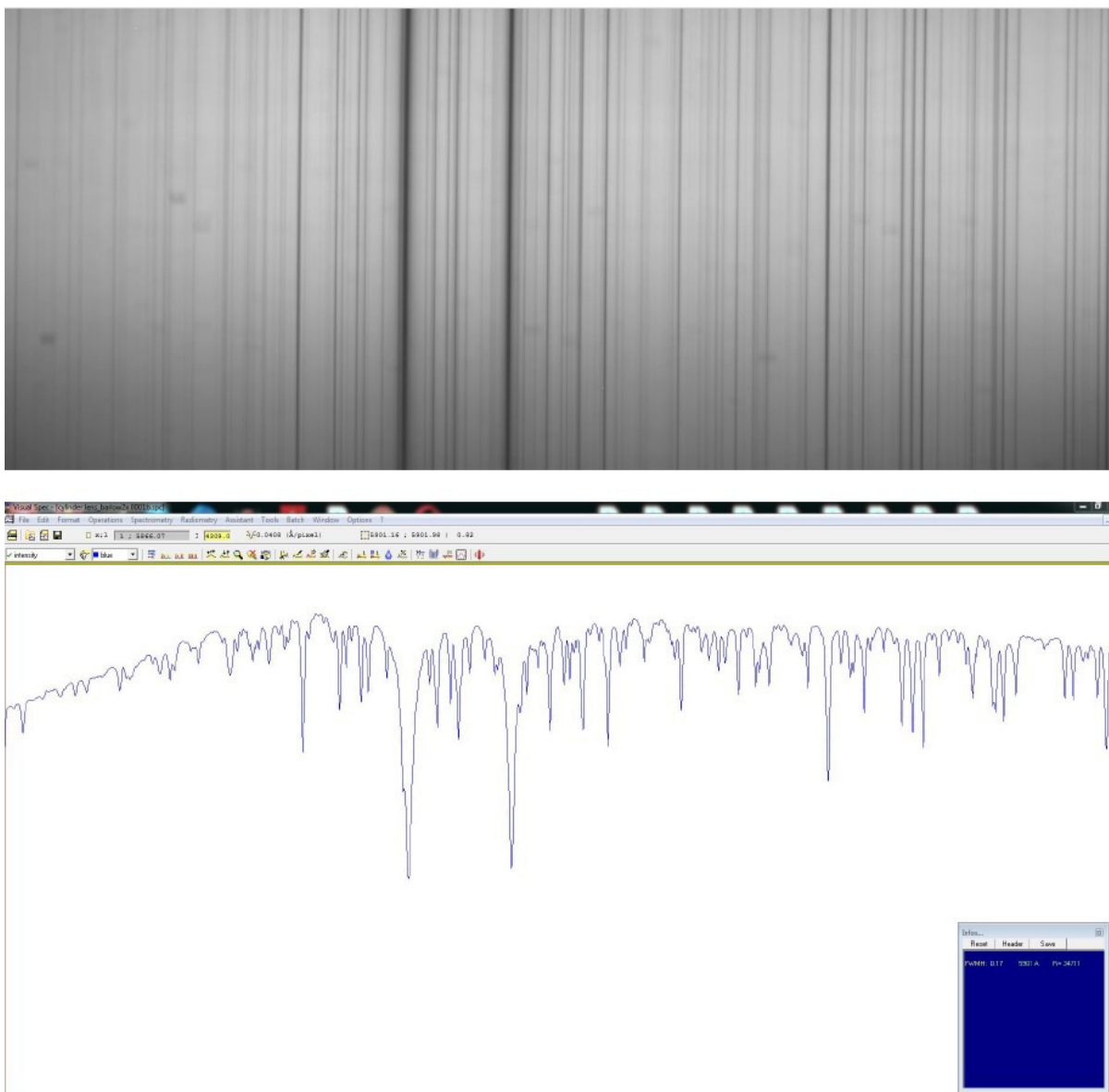


Nel profilo spettrale seguente è mostrato il confronto tra R misurata a 6543 Å con fenditura aperta a circa 30 micron e quella aperta a circa 15 micron.

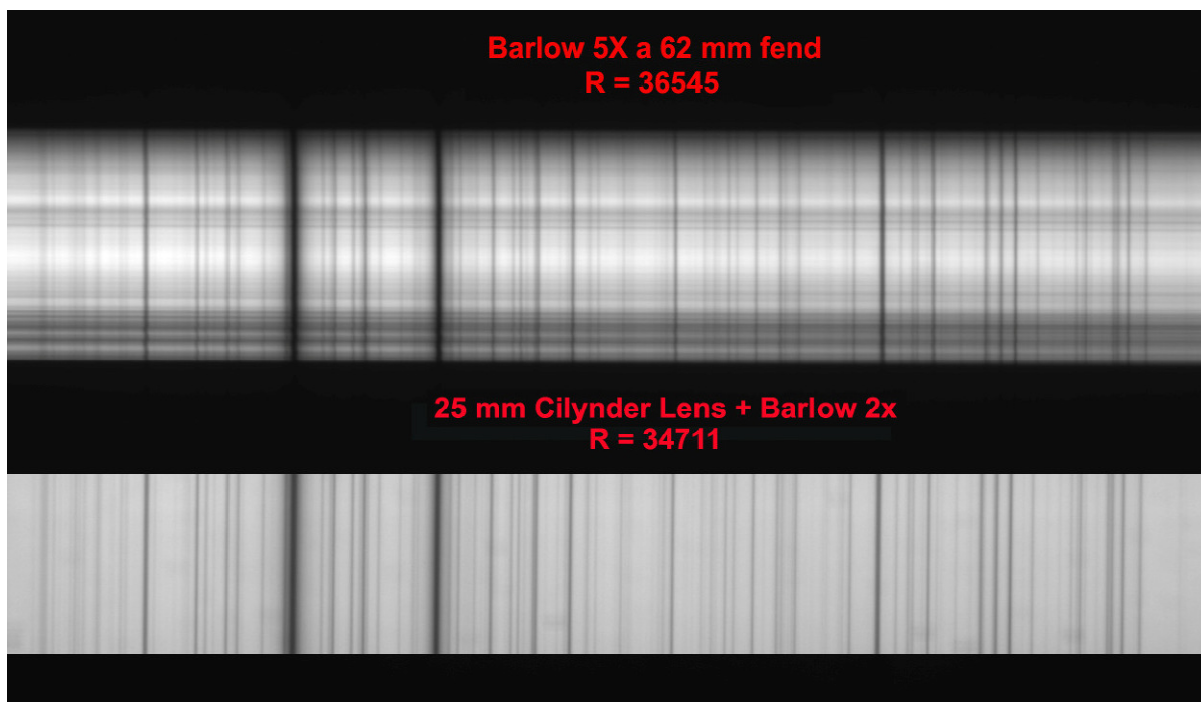


Zona Na

Con una lente cilindrica posta a 52 mm dalla fenditura ed una barlow 2X a 6 mm dalla lente cilindrica si ottiene inoltre il seguente spettro bidimensionale e profilo spettrale, Il potere risolutivo a 5901 Å e pari a **R= 34711**



Di seguito è riportato il confronto, nella zona del sodio, di quest'ultima soluzione con quella della barlow 5X vista in precedenza.



In conclusione, l'applicazione di una barlow 5X a 62 mm dalla fenditura comporta un miglioramento nel potere risolutivo spettrale di circa il 75%. Ovviamente trattasi di potere risolutivo "sul campo" e non teorico, che, per quanto non particolarmente elevato, può essere decisivo in alcune applicazioni come lo splitting Zeeman delle righe. Diverso il risultato con una lente cilindrica, che, come si è visto, comporta solo un miglioramento trascurabile nel potere risolutivo, ma enorme nella definizione degli spettri bidimensionali con fenditure molto chiuse per l'assenza del trasversalium. La Lente cilindrica accoppiata ad una barlow 2X comporta invece, oltre alla pratica assenza di trasversalium un aumento consistente nel potere risolutivo spettrale di circa il 68%.

Un'altra, facile soluzione per incrementare la risoluzione spettrale e (poco) quella spaziale è inserire una Barlow 2 x o 3 X prima della camera, raddoppiando e triplicando la focale dell'ottica di collimazione. Ciò può essere utile quando non si intendono fare riprese a tutto disco e si vogliono invece riprendere particolari sul disco solare.

IL Software

Sono passati 4 anni dalla pubblicazione del mio libro di spettroeliografia nel 2019. In questo periodo sono intervenuti nuovi software freeware di ricostruzione delle immagini spettroeliografiche, che danno risultati sorprendenti ed in linea con quelli dei filtri commerciali "stacked".

Il primo di questi in ordine di tempo è stato il software INTI, appositamente dedicato alla spettroeliografia col sistema di spettroeliografia Sol EX di C. Buil, realizzato dall'astrofila francese Valerie Desnoux e liberamente scaricabile dal suo sito <http://valerie.desnoux.free.fr/inti/>

Si tratta di un software semplice e completo, che tuttavia può essere usato con i soli files SER a 14 o 16 bit. Da ciò deriva che coloro che come il sottoscritto possiedono camere a 8 bit con files AVI, non possono usare il predetto programma. A questa situazione hanno fatto fronte alcuni programmatori, tra i quali cito "Gli Smiths", ovvero Douglas Smith ed il figlio Andrew, astrofili inglesi, producendo un eccellente software, modificazione di INTI, (Solex Avi Recon) che funziona anche coi files AVI e permette di modulare la routine di eliminazione del transversalium e molte altre scelte.

Il software in questione, nella versione originale o modificata, è molto sofisticato e complesso; in sintesi esso effettua le seguenti operazioni:

1- Il primo passo è quello di creare una riga spettrale media: questa a sua volta media allo stesso modo tutti i frames del video della scansione.

2- il programma trova il centro della riga più scura: detto centro è individuato dal punto più scuro della riga stessa.

3- Si modella la riga come polinomiale: alcuni usano una parabola (polinomiale di 2 ordine) altri una cubica.

4- Il video è letto una seconda volta e la polinomiale è mappata frame per frame e proiettata su una griglia cartesiana.

5-Il passo successivo è la individuazione del bordo che viene usato per effettuare una correzione geometrica trasformando un'ellisse in un cerchio.

6-Viene quindi effettuato la rimozione del transversalium, eliminando le righe parallele alla direzione di scansione.

7-Viene infine applicato un aggiustamento dei livelli (per esempio CLAHE) per definire il contrasto ed il range dinamico dei dati dell'immagine.

Il software SolEx Avi Recon degli Smiths è ora, nel momento in cui scrivo, arrivato alla versione 4.3, che presenta un numero notevole di comandi e funzioni per ottimizzare le immagini spettroeliografiche.

Tale release è liberamente scaricabile al link: https://github.com/thelondonsmiths/Solex_ser_recon_EN/releases


Il programma consta di due versioni, una per Windows executable, ed un'altra che richiede l'installazione del software Python per funzionare.

Come detto in precedenza, detto software permette l'eliminazione del transversalium con vari gradi di forza in funzione della incisione delle righe, permette di operare modifiche sulle immagini di output, di ottenerle squadrate e invertite e di selezionarle per ogni pixel della riga, ovvero di ottenere immagini dalla somma di più pixel e molto altro.

Una volta aperto il file video il programma impiega pochi secondi a sfornare un'immagine, non solo del disco solare, ma anche delle protuberanze su disco nero, se visibili, e quindi permette di controllare quasi in tempo reale la messa a fuoco dello spettroeliografo, le impostazioni del software di acquisizione, etc.

E' scaricabile anche un file d'installazione ed uso. Sotto, uno screenshot del programma in questione, disponibile anche in lingua italiana.

Solar disk reconstruction from SHG video files

 English ▼

File input mode Folder input mode

File(s) C:/DMK 51/Vid6/Prot/

Choose file(s)

Output Folder (blank for same as input):

Choose output folder

☐ Show graphics ☐ Save fits files☐ Save clahe.png only ☒ Save protus.png only☒ Crop square

Fixed image width (blank for none)

☐ Mirror X

Rotate png images:

0

☐ ☐☒ Correct transversalium lines ☐ Stubborn transversalium ☒ de-vignette

Transversalium correction strength (pixels x 100) :

3.0

☐ ☐

Y/X ratio (blank for auto)

Tilt angle (blank for auto)

Pixel offset

0

Protus adjustment

2

Ellipse fit shift [advanced]

30

OK

Cancel

Spectral analyser

Open output folder

Esempi di spettroeliogrammi

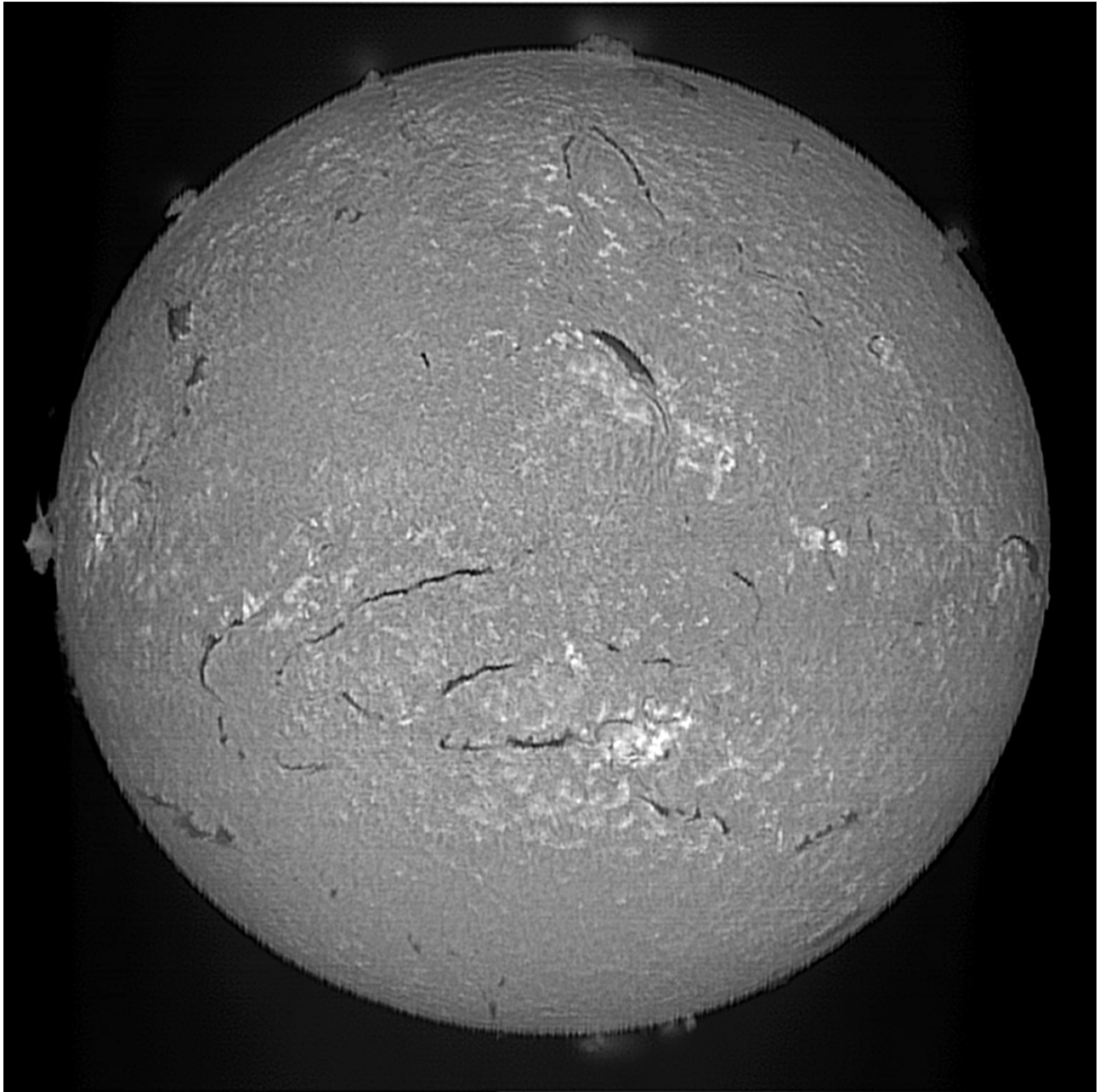
Lo strumento del quale ho mostrato il Layout, VHIRSS, è attualmente da me usato esclusivamente per l'imaging H alpha , mentre gli altri vengono destinati all'imaging in altre lunghezze d'onda, come CaII K e H,Al1, Cn, H beta , H gamma Fe1, mentre Solarscan, il più sofisticato, viene usato per la misurazione dei campi magnetici delle macchie solari tramite l'effetto Zeeman.

Quanto all'elaborazione degli spettroeliogrammi, per elaborazione intendo soltanto alcuni passaggi cosmetici per rendere le immagini più piacevoli dal punto di vista estetico. Va da se che tali modifiche dei files (Fits, PNG, BMP) li rendono poi non utilizzabili per qualsiasi attività scientifica.

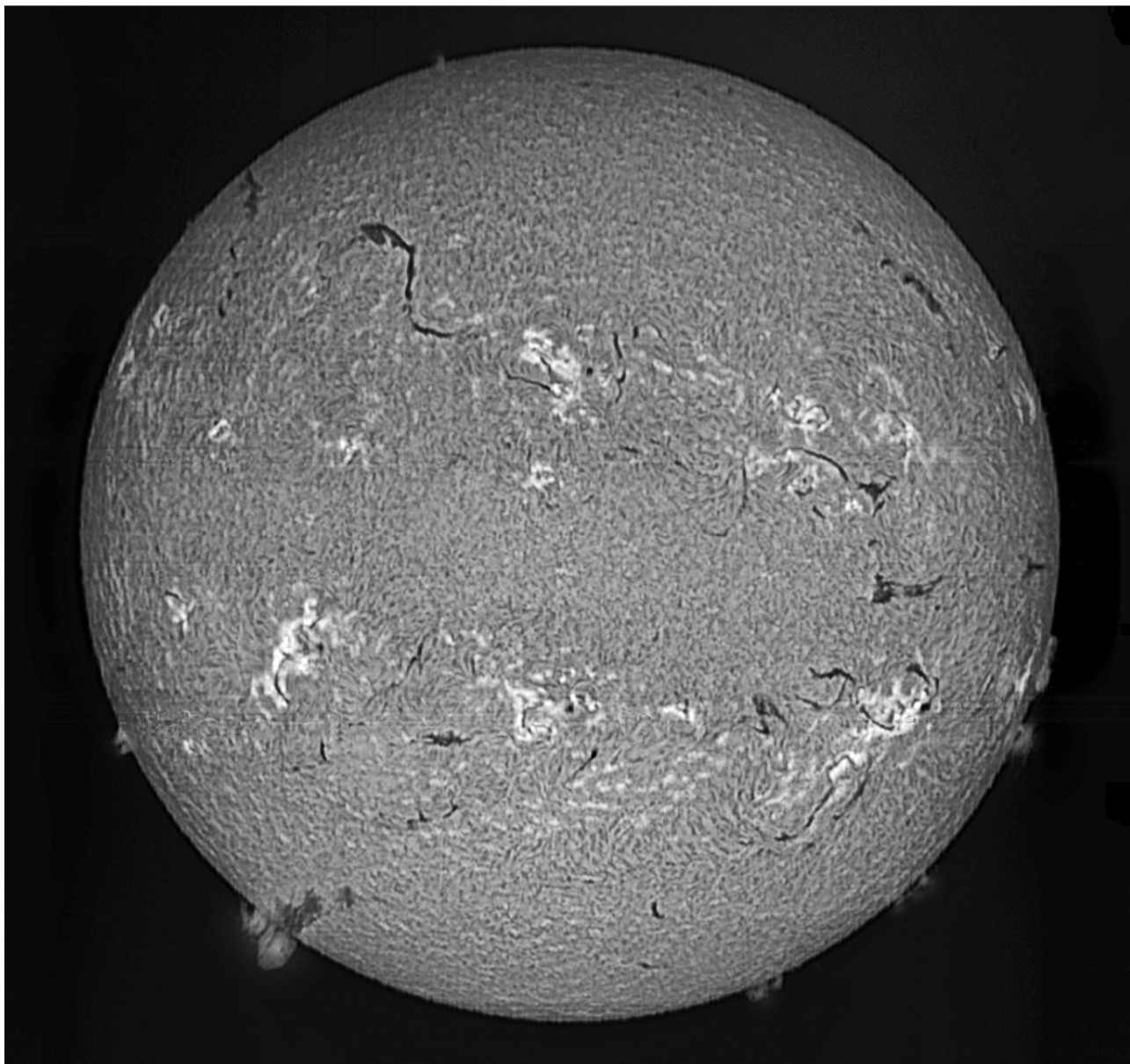
In genere uso lo stacking di più frame raw con Registax 6 o Autostakkert, e sul risultato applico un filtro Wavelet, e applico poi sul tutto I livelli con Photoshop.

Ecco ora alcuni esempi di spettroeliogrammi H alpha ottenuti con VHIRSS, tutti del 2023.

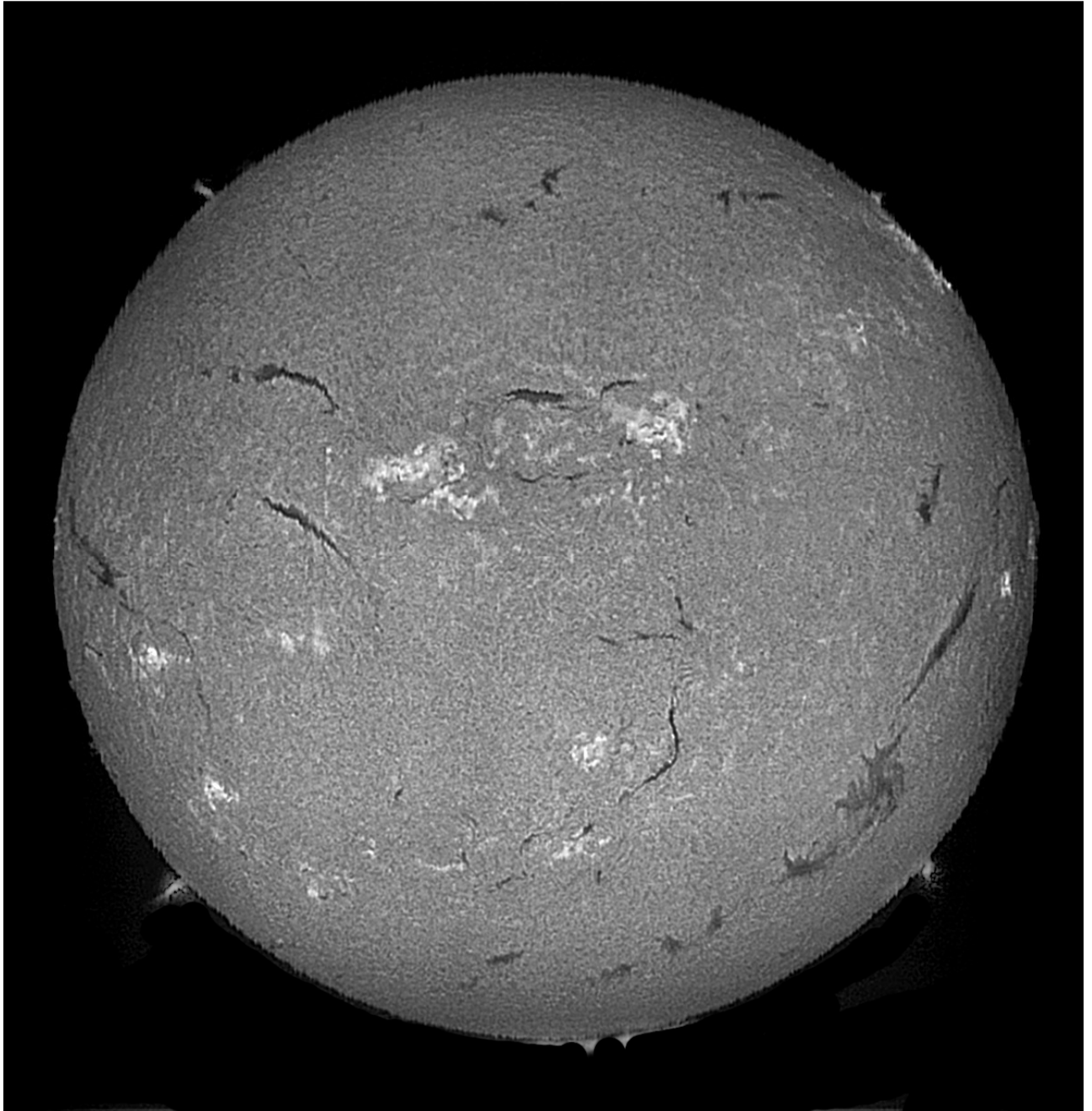
La qualità delle immagini, come si osserva, è ormai anni luce lontana da quella di solo quattro anni fa, e tende a superare quella dei filtri commerciali ed a eguagliare l'output di Osservatori professionali con torri solari di decine di metri di altezza e ciò con uno strumento assemblato in casa, con tutti i limiti e difetti di un tale tipo di costruzione.



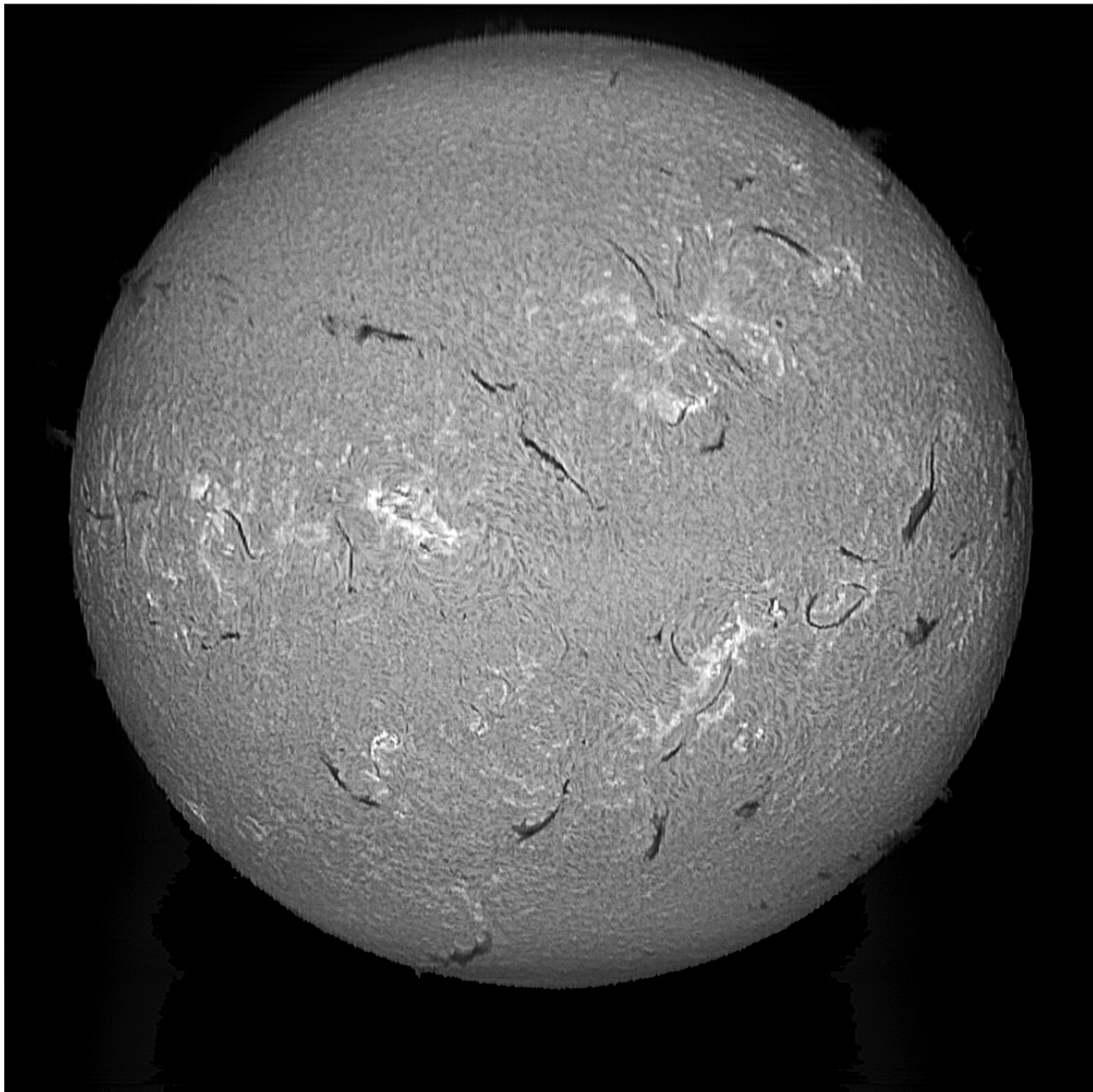
Spettroeliogramma H alpha del 4 aprile 2023



Spettroeliogramma H alpha del 23 giugno 2023



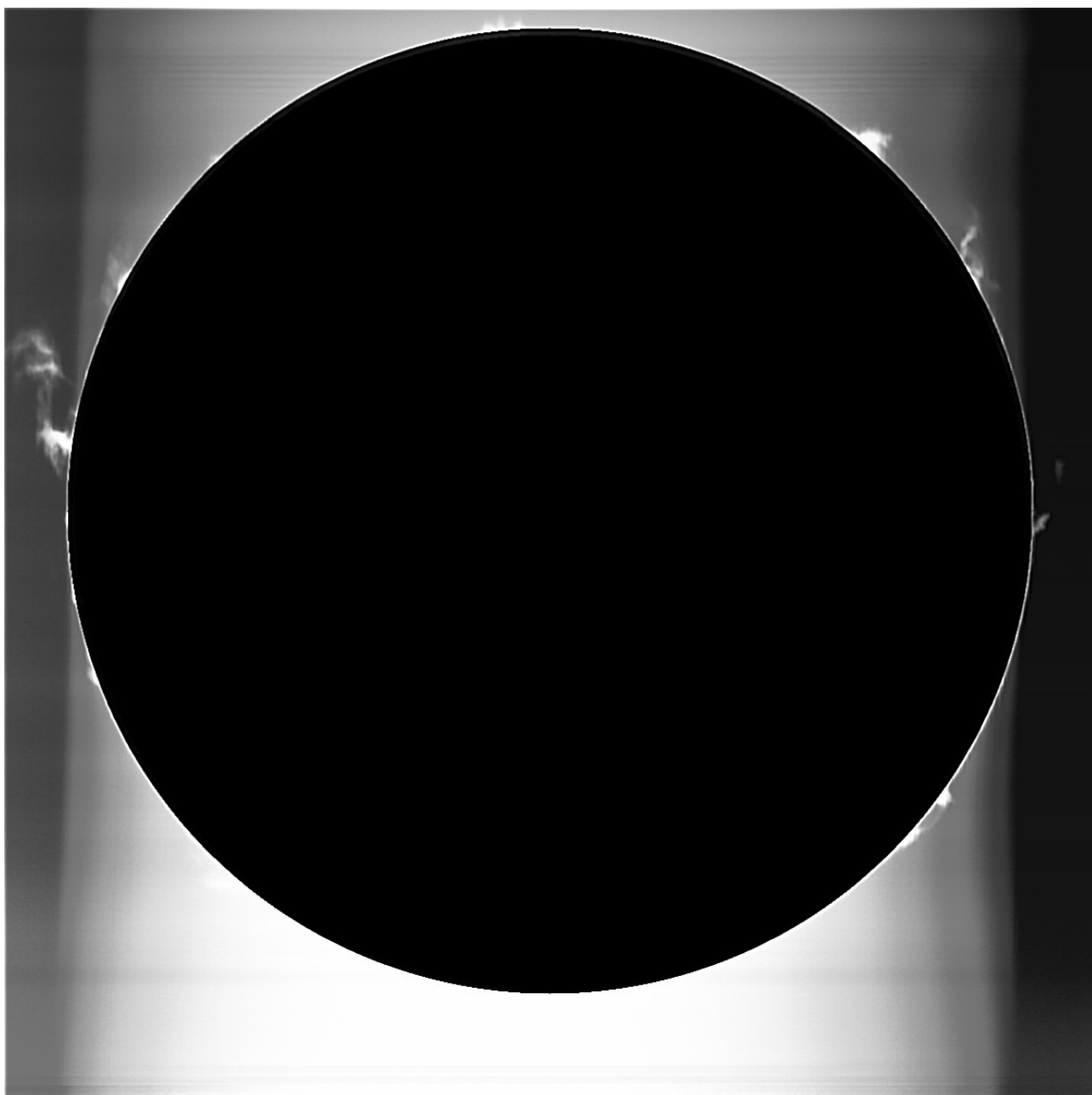
Spettroeliogramma H alpha dell' 11 settembre 2023



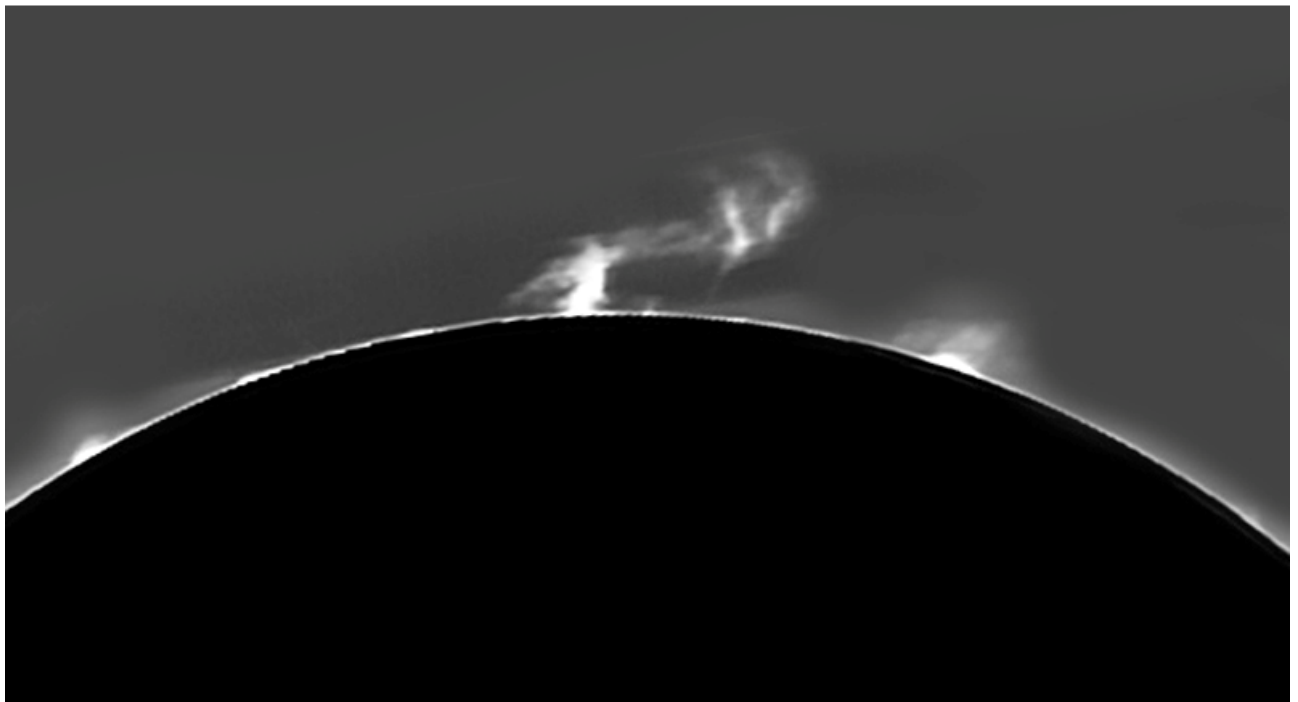
Spettroeliogramma H alpha del 4 ottobre 2023



Non solo spettroeliogrammi dell'intero disco solare, ma anche di particolari sul disco, come questo filamento, ripreso nel settembre 2023. Notare l'aspetto tridimensionale, classico delle immagini spettroeliografiche.



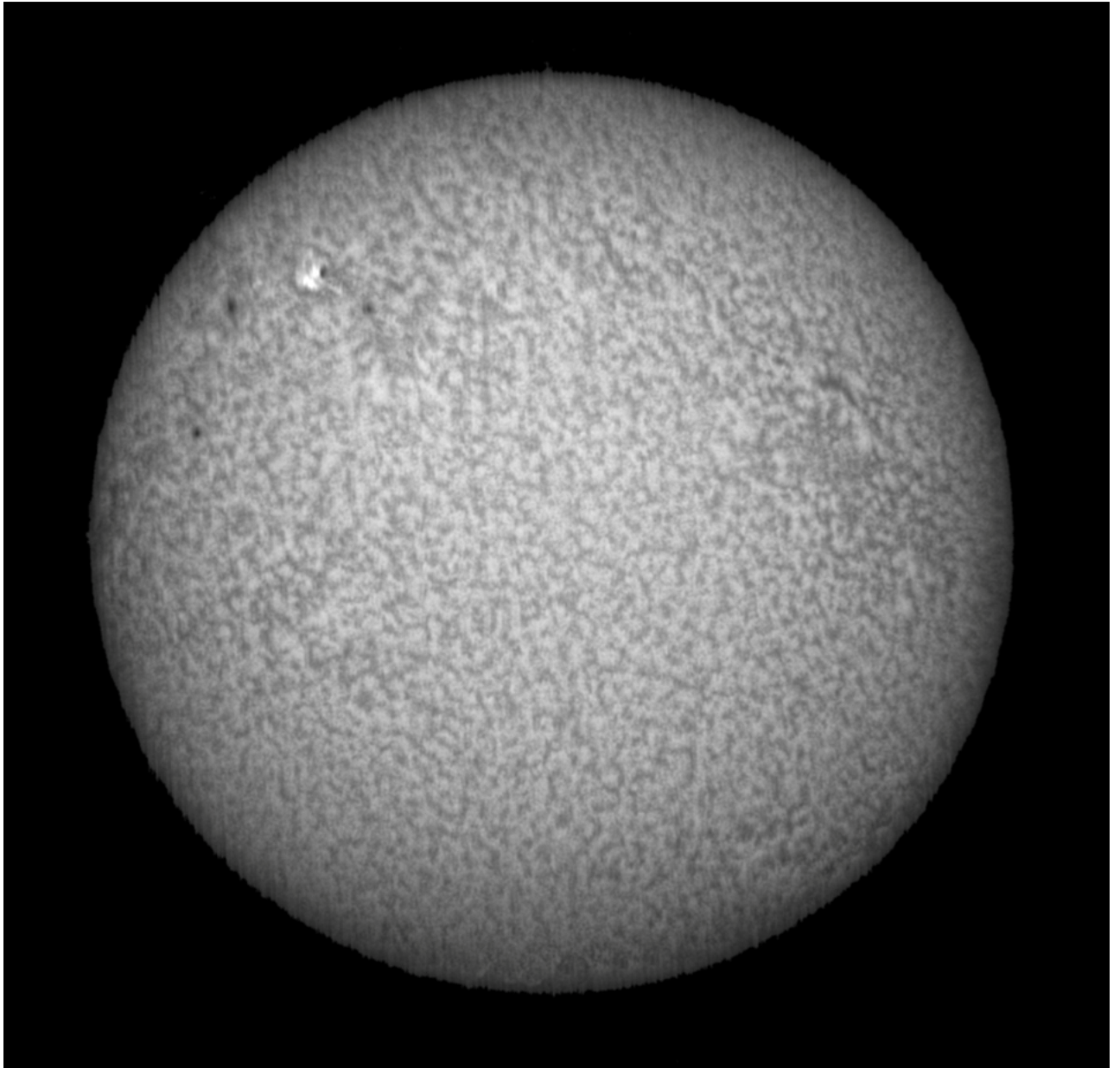
Proturberanze visibili nello spettroeliogramma del 4 ottobre 2023



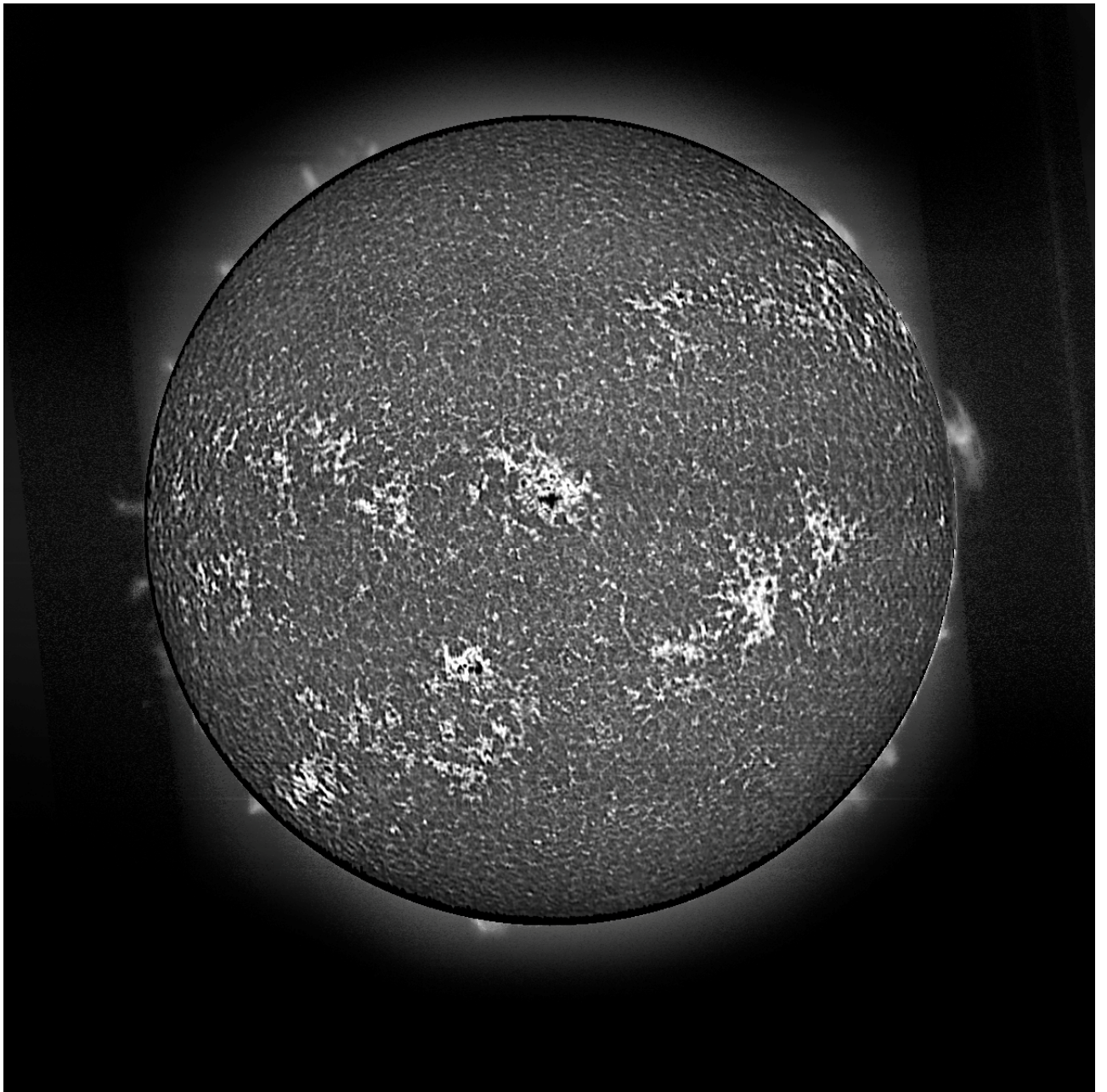
Dettaglio delle protuberanze dello spettroeliogramma H alpha del 4 ottobre 2023

Come si osserva, la qualità è elevata, e l'incisione dei particolari eccellente, con la possibilità di riprendere anche le protuberanze nella stessa scansione.

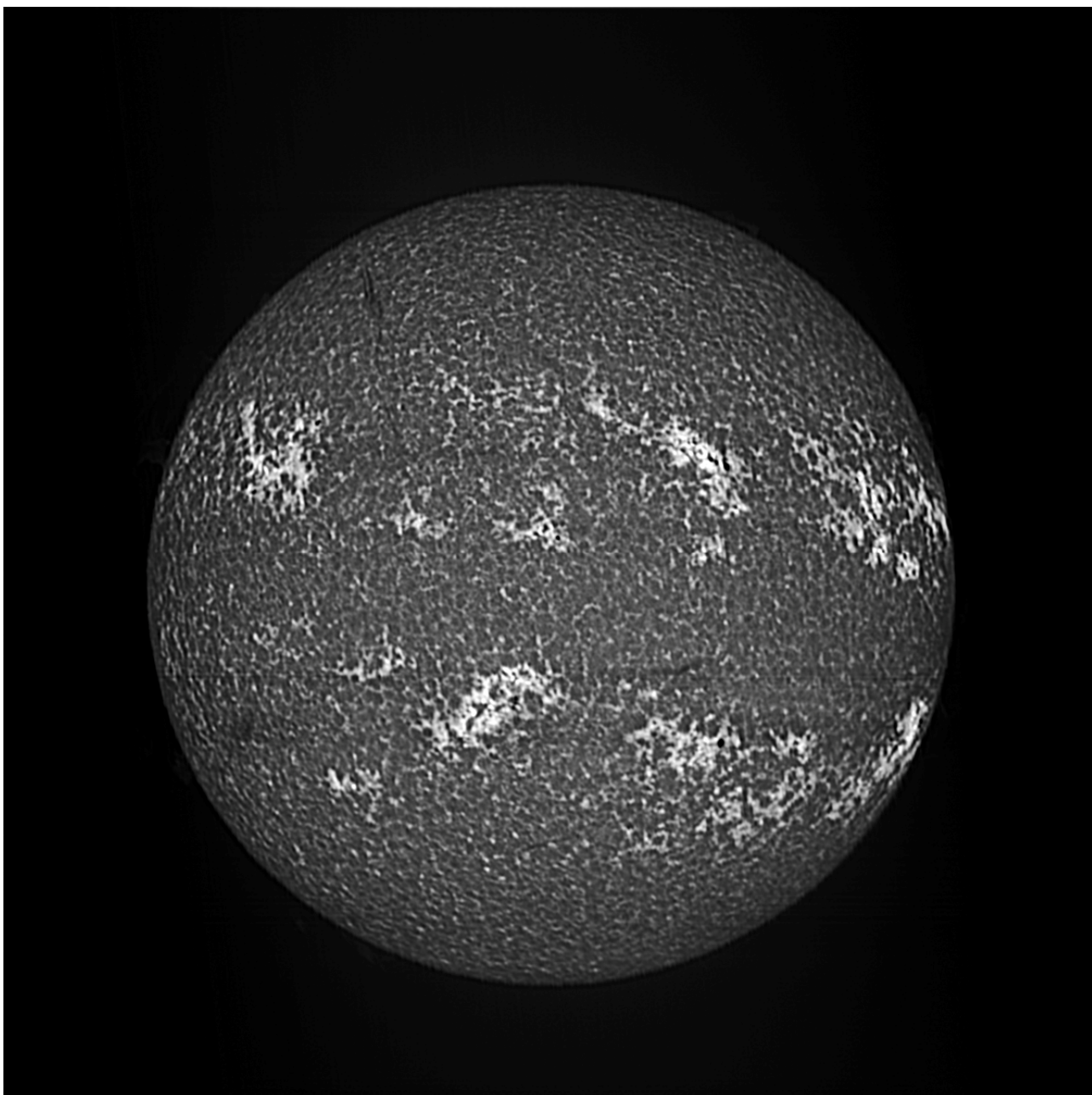
Ma non c'è solo l'Idrogeno alfa alla portata degli spettroeliografi amatoriali. In realtà qualsiasi riga dello spettro solare visibile può essere ripresa ed indagata a fondo. Qui di seguito alcuni esempi.



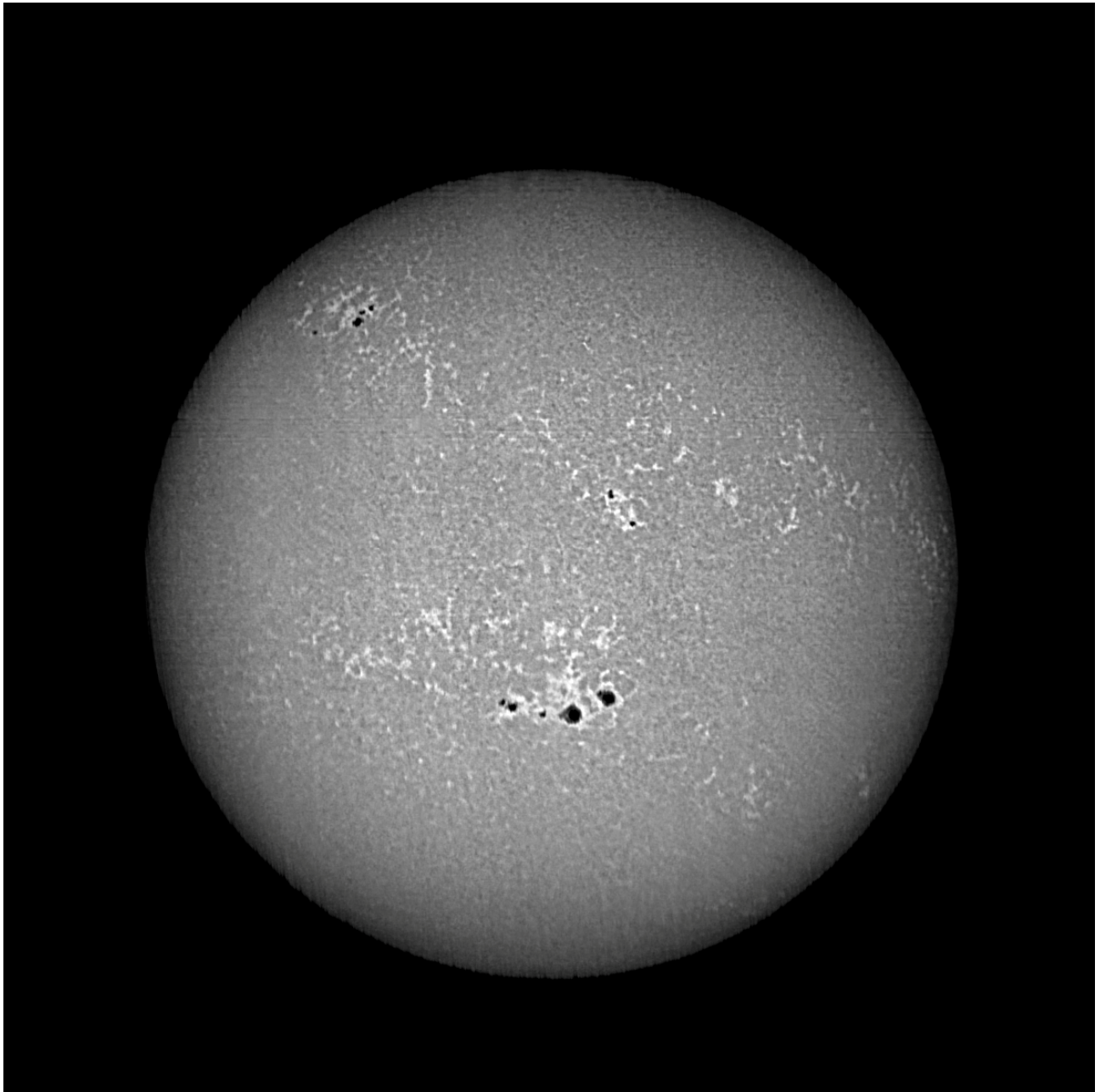
Uno spettroeliogramma H beta a 4861 Å ripreso il 4 maggio 2023 con lo spettrografo UPS (Ultra Portable Spectrograph)



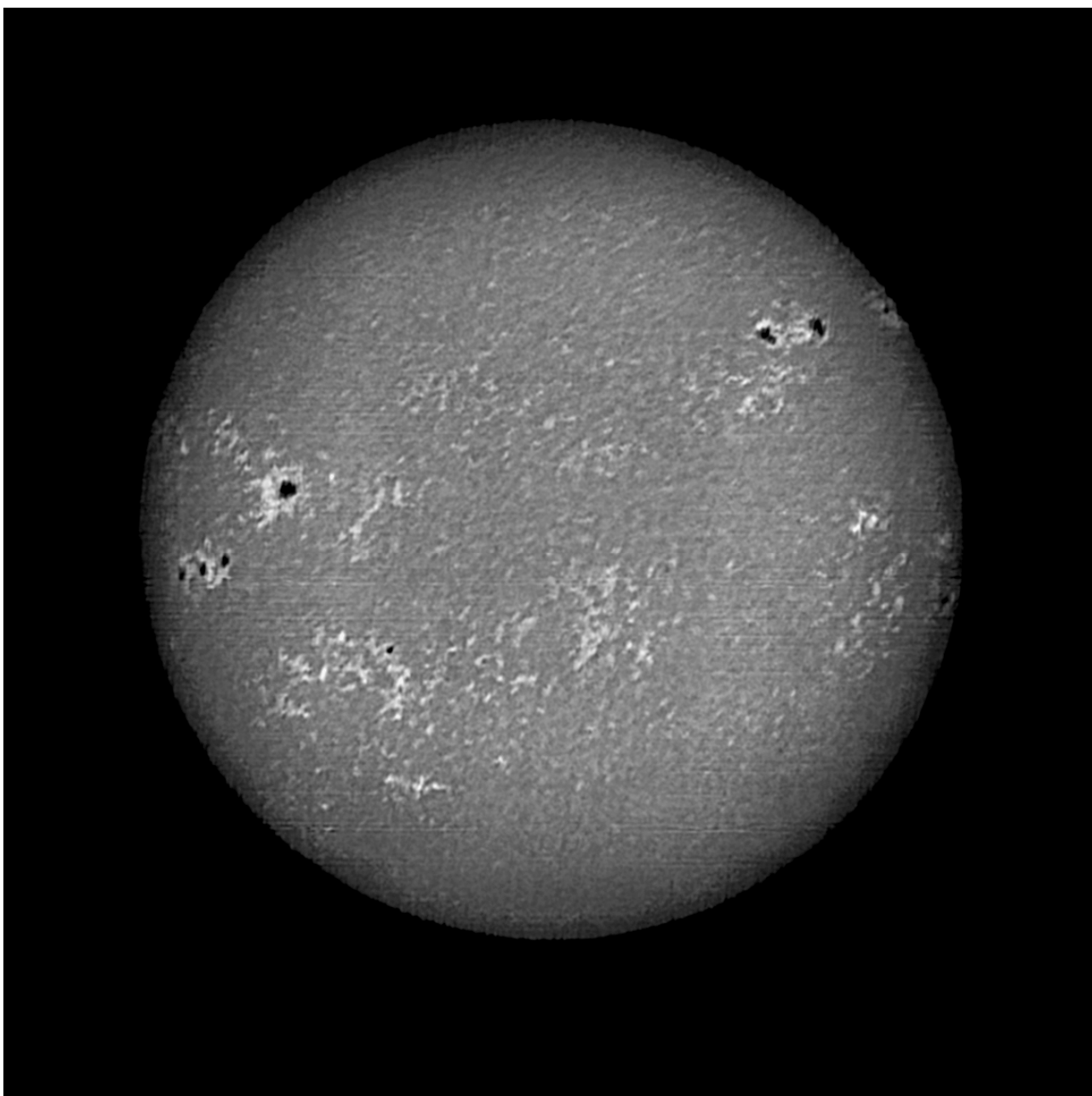
Uno spettroeliogramma CaII H a 3968 Å ripreso con lo spettrografo POSS2 il 27 agosto 2023. Notare l'immagine del disco con le protuberanze, frutto di una composizione di due spettroeliogrammi diversi.



Spettroeliogramma in luce CaII K a 3933 A ottenuto con POSS2 il 25 giugno 2023



Spettroeliogramma in luce AL1 (alluminio) a 3961 Å del 28 aprile 2023



Spettroeliogramma nella banda molecolare del Cianogeno (Cn) a 3883 Å ripreso il 2 giugno 2023 con POSS2, impresa non facile per la sottigliezza delle righe della banda e possibile solo per l'alta dispersione e risoluzione dello strumento usato).

Le immagini sopra mostrate costituiscono solo un esempio delle potenzialità di indagine della spettroeliografia, una volta campo dell'astrofisica di esclusivo appannaggio dei professionisti, ed oggi alla portata degli amatori desiderosi di approfondire la conoscenza della stella a noi più vicina, con entusiasmo e capacità nell'astronomia pratica, in uno col potentissimo motore che accomuna tutti gli astrofili: la curiosità della scoperta.

Cosa osservare con la spettroeliografia digitale

Mi sembra ora di sentire il lettore interessato a questo argomento chiedere :ma cosa si può osservare con la spettroeliografia? La risposta è immediata: le principali caratteristiche della cromosfera, l'atmosfera solare, nelle zone relative alle righe degli elementi in essa presenti (idrogeno, calcio, etc) , tenendo conto che righe di elementi diversi e punti delle righe diversi forniscono informazioni su strati della cromosfera di differente altezza e temperatura. l'osservazione dell'atmosfera solare riveste un grande interesse, anche per l'amatore, in quanto sede di fenomeni complessi, come ad esempio i flares, ed è da sempre oggetto di studio in campo professionale.

Le principali caratteristiche e strutture cromosferiche sono:

- Le "Plages", strutture brillanti intorno alle macchie fotosferiche, dovute alla concentrazione di attività magnetica in tali zone "attive".In luce CaII K e H le zone brillanti, corrispondenti in genere alle regioni attive prendono il nome di facole.
- I Mottles,che costituiscono gli elementi della supergranulazione cromosferica, ed appaiono scuri o poco luminosi in luce Halpha (assorbimento) e brillanti in luce CaII K e H (emissione).
- Le Proturberanze, getti di materia che si estendono oltre la superficie solare per effetto di forti campi magnetici.Esse appaiono luminose sul bordo del disco solare.
- I Filamenti, strie di colore scuro, non sono altro che le stesse proturberanze proiettate sul disco, che appaiono scure per contrasto.
- Le "Spicules", "l'erba della cromosfera", piccole eiezioni di plasma sulla base della cromosfera che si osservano sul bordo solare.
- I Flares. In alcune condizioni, nella cromosfera, in prossimità delle regioni attive, si sviluppano fenomeni energetici di particolare intensità detti flares, che arrivano sino all'equivalente di 160 miliardi di megaton! Essi hanno luogo per fenomeni di riconnessione magnetica che accelerano particelle cariche e le portano in collisione col plasma e possono essere associati, anche se non sempre, a fenomeni di eiezione di massa coronale (CME).Il loro studio costituisce uno dei punti di interesse della fisica solare.

Le righe cromosferiche dello spettro solare più note all'amatore, in quanto per esse sono concepiti gli strumenti per l'osservazione amatoriale, sono essenzialmente due, quella dell'Idrogeno ionizzato a 6563 Å e quelle del Calcio ionizzato CaII K e H a 3933 e 3968 Å. Occorre dire, tuttavia, che, mentre l'osservazione in luce H alpha può essere effettuata anche visualmente, quella nelle righe del calcio è prerogativa quasi esclusiva dell'imaging CCD o CMOS per la scarsa sensibilità dell'occhio al violetto.

Molti appassionati del sole, tuttavia, non conoscono a fondo le differenze che intercorrono tra i due diversi tipi di osservazione della cromosfera solare, in luce H alpha e CaII K e H né tantomeno le differenze fisiche tra le due righe e le relative popolazioni atomiche nell'atmosfera del sole. Questa parte del presente testo è quindi finalizzata a chiarire brevemente l'importanza dell'osservazione solare in luce Calcio, ed in tutta la banda del vicino UV ancora accessibile a strumenti amatoriali.

Occorre al riguardo premettere che l'osservazione delle righe dello spettro solare non è fine a se stessa. Essa ci fornisce preziosi elementi di conoscenza ed informazione su:

1-Gli elementi chimici presenti sul Sole, dato che le righe associate ad una data lunghezza d'onda costituiscono delle vere e proprie impronte digitali caratteristiche di ogni singolo elemento.

2-L 'abbondanza atomica dell'elemento, dedotta dall'intensità delle righe.

3- La temperatura alla quale si trovano gli elementi relativi alla riga o le loro transizioni atomiche, dato che le transizioni ai diversi livelli atomici avvengono a temperature diverse. La temperatura è derivata anche dalla larghezza della riga interessata.

4-Il campo magnetico della regione studiata grazie all'effetto Zeeman che provoca lo splitting (divisione in 2 o 3 parti) delle righe sensibili ai campi magnetici.

5-Il moto del plasma solare rispetto all'osservatore per effetto Doppler.

Perché il CaII K e H nell'UV

Ma perché osservare la Cromosfera in banda UV invece del solito e tutto sommato comodo H alpha, per il quale esiste una pletora di filtri e telescopi dedicati a prezzi non eccessivi, e che permette anche l'osservazione visuale senza problemi?

Nel paper di Vernazza ed altri (Structure of Solar Chromosphere-1981) è pubblicato il diagramma sottostante che sintetizza in modo semplice ed immediato le differenze di altezza e temperatura nel sole quieto tra le osservazioni nella diverse righe spettrali delle popolazioni atomiche presenti in cromosfera.

No. 4, 1981

QUIET SUN EUV BRIGHTNESS COMPONENTS

637

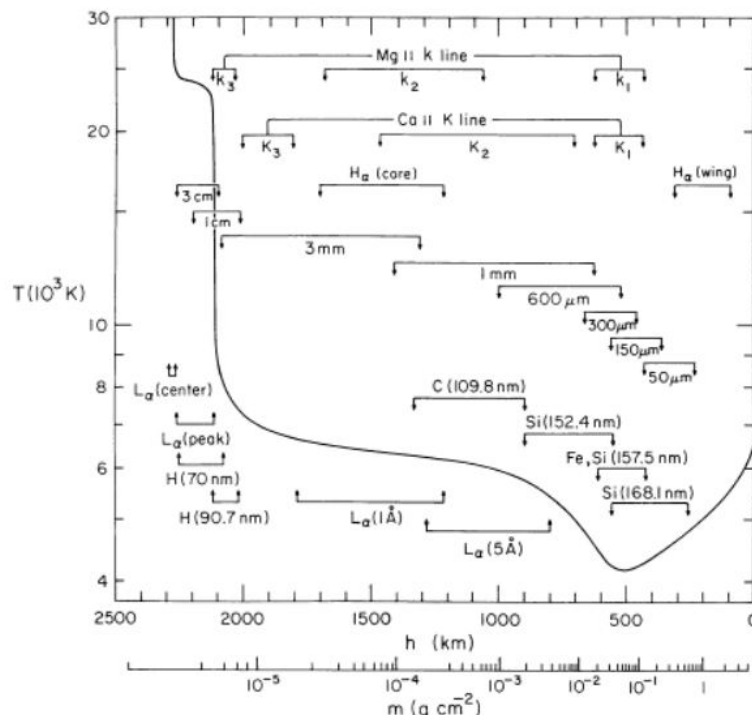
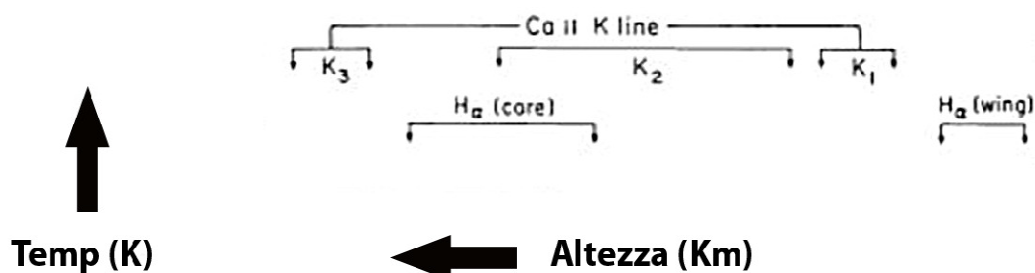


FIG. 1.— The average quiet-Sun temperature distribution derived from the EUV continuum, the $L\alpha$ line, and other observations. The approximate depths where the various continua and lines originate are indicated.

La prima cosa che salta all'occhio nel diagramma è quella che , andando dalle ali, al centro delle righe di maggior importanza in cromosfera, come H alpha e Ca II si va dall'alta fotosfera all'alta cromosfera, ovvero si sale in altezza, dai circa 200-300 Km delle ali dell'Halpha ai circa 1800-2000Km della parte centrale della riga CaII K, la CaIIK 3: contemporaneamente si sale di temperatura sulla base della curva .

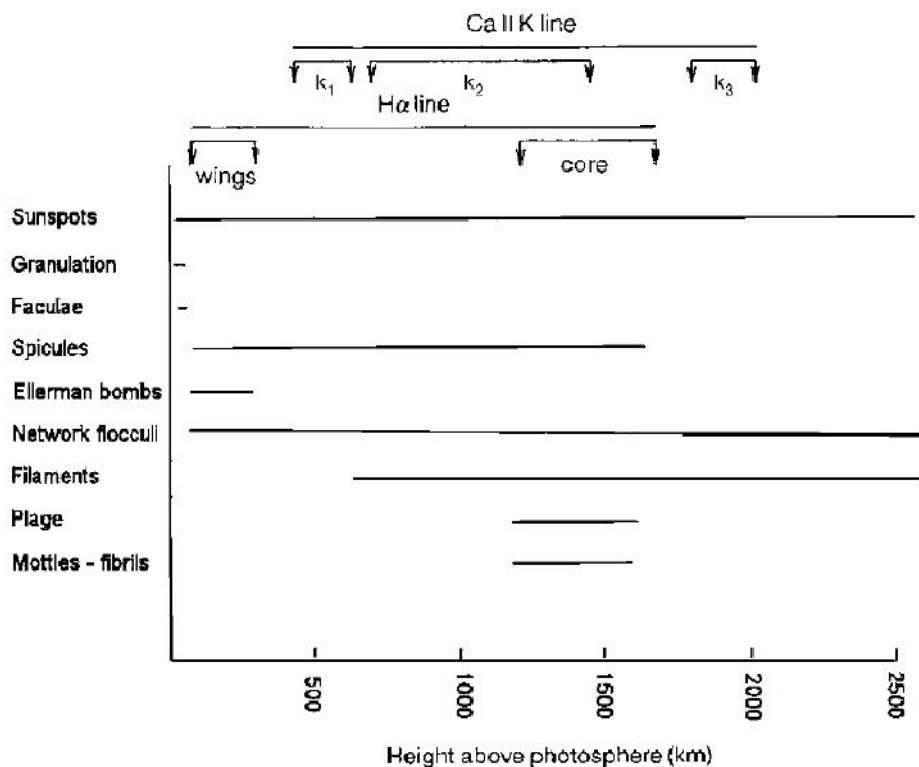
Ci spiega anche un'altra cosa, che il centro della riga CaIIK (K3) si trova un po' più in alto ed ad una temperatura maggiore di quello dell'Halpha.



Per chiarire ulteriormente il concetto, il diagramma che segue ci mostra come determinati fenomeni fisici presenti sul sole (macchie, facole, filamenti, plages, etc) presentano un diverso aspetto non solo a seconda dell'elemento nella cui luce sono registrati od osservati (ad esempio Idrogeno alfa o Calcio ionizzato) ma anche se l'osservazione viene effettuata al centro della riga dei predetti elementi o sulle ali, in quanto andando dalle ali verso il centro riga vuol dire andare verso la parte alta della cromosfera e salire verso temperature più elevate, mentre, all'inverso, dal centro verso le ali ci si sposta verso la bassa cromosfera e la fotosfera.

Per esempio: nella zona del CaIIK3, al centro della riga CaII K si osservano solo macchie, flocculi, ma, dato che in questo punto la sensibilità della riga ai campi magnetici è massima, i predetti elementi si osservano in emissione, con una brillantezza sconosciuta in H alpha mentre i filamenti sono meno evidenti.

Nell'esempio riportato nel diagramma, riferito all'H alpha, si osserva come, spostandosi dal centro riga verso l'ala blu (cosa che normalmente si ottiene, con alcuni telescopi solari con etalon frontale col tilting dello stesso) si passa dalla visibilità delle più importanti caratteristiche cromosferiche alla visione della sola granulazione, flocculi, spicules ovvero l'immagine si impoverisce. Anche la visione delle macchie perde di intensità.



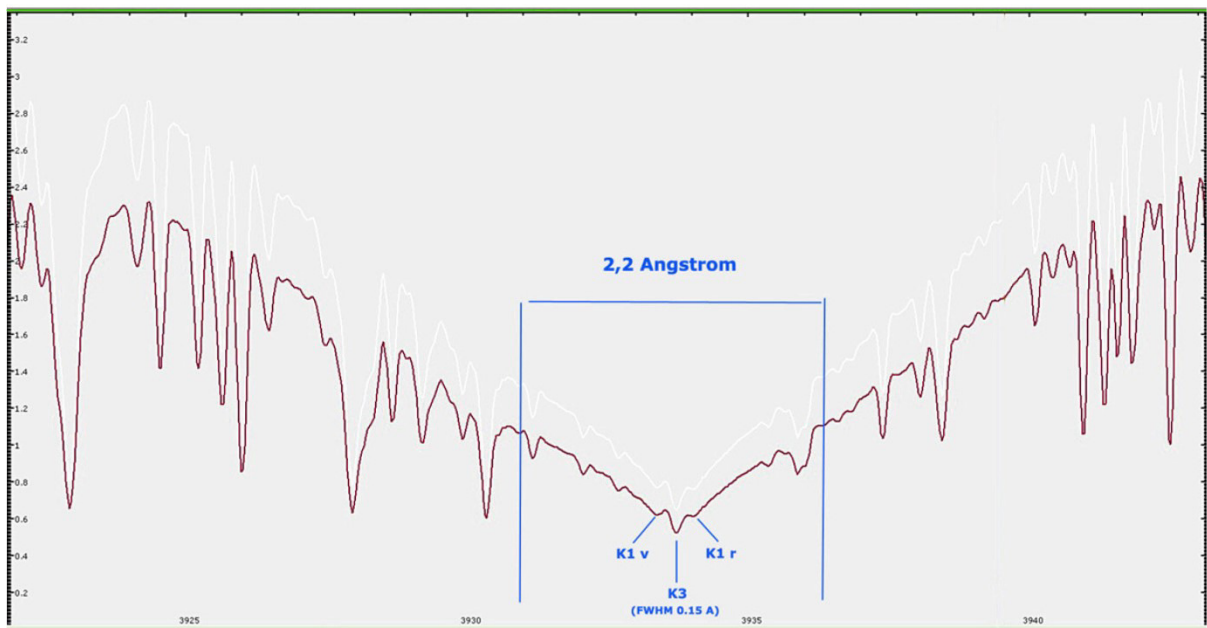
Le righe del Calcio, ed in particolare la CaIIK possono essere considerati indicatori attendibili della densità del flusso magnetico nella linea di vista, e di identificazione delle plages attraverso il ciclo e le serie storiche dei cicli solari, come risulta dall'art: I. Ermolli ed altri "Comparison CaII K spectroheliograms time series with an application to solar activity studies" The Astronomical Journal, may, 27 2009.

La riga CaII K riveste molta importanza nello studio dell'attività solare e della cromosfera in particolare. L'NSO (National Solar Observatory) di Sacramento Peak in Arizona (USA) ha effettuato per un lungo periodo di tempo, dal 1976 al 2015, un'attività di monitoraggio della riga in questione, valutando, tra l'altro, i parametri dell'indice di emissione (EM) corrispondente alla EW (Equivalent Width) di un intervallo di 1 Å centrato sulla riga, ed i valori di intensità del core K3 (0.15 Å) della riga stessa. Dall'ottobre 2015 il programma di monitoraggio di Sacramento Peak è stato sospeso, in quanto si utilizzano ora i dati del progetto SOLIS - ISS (Integrated Sunlight Spectrometer), attivo presso l'NSO - Kitt Peak, uno spettrografo capace di risoluzione $R=300000$ e di un range di lunghezza d'onda da 350 a 1100 nm. Il monitoraggio si estende anche alla riga CaII H.

Abbiamo quindi due buone ragioni per osservare nelle righe CaII K e H: la forte componente di emissione che provoca le aree brillanti coincidenti con le plages, (che a loro volta coincidono con le regioni

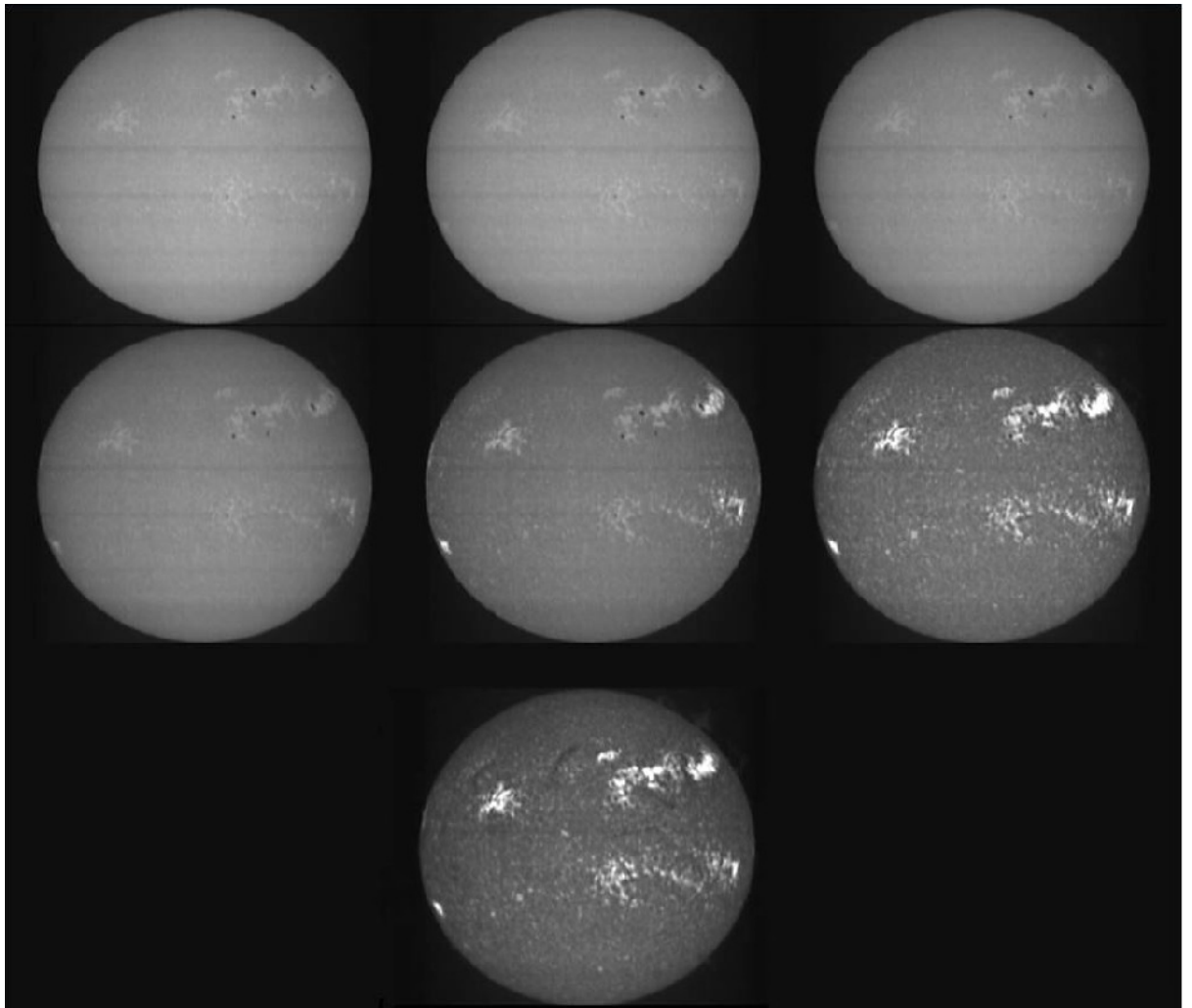
attive), ed il cd. Chromospheric network, ovvero con le celle di supergranulazione, coi bordi di queste. Ma la componente in emissione (plages) strettamente legata ai campi magnetici, e la sua intensità talvolta relativamente proporzionale all'intensità di questa. Le celle hanno dimensioni di circa 30000-35000 Km e durata di circa 24 h, mentre quelle fotosferiche (granuli) hanno dimensioni di 1000 Km e durata media di 8-10 min. I granuli si osservano a livello fotosferico, i supergranuli nell'alta fotosfera e cromosfera.

Il profilo spettrale e l'ampiezza di banda della riga CaII K è notevolmente superiore a quelle dell'H alpha, più del doppio, e si aggira sui 2.2 Å, compresi i punti di stazionarietà K1 ed il centro riga K3 che ha un'ampiezza di 0.15 Å. Da un certo punto di vista, quindi, i filtri in luce Calcio ionizzato non hanno, come l'H alpha, bisogno di bande particolarmente strette per dare immagini contrastate e visivamente piacevoli del disco solare. Pressoché analoga quella della riga CaII H.



In conclusione, la spettroeliografia digitale permette l'accesso ad una serie di osservazioni, alcune anche di natura scientifica, non possibile

coi comuni filtri commerciali. Ad esempio, andare dalle ali di una riga verso il centro e salire quindi di altezza e temperature in cromosfera, osservandone le diverse strutture e connotazioni fisiche, come risulta dalla seguente composizione di spettroeliogrammi della riga CaIIK dall'ala blu al centro riga.



Non solo imaging

Dopo questa panoramica sulle possibilità offerte dall'osservazione spettroeliografica in questi ultimi anni, a mio avviso di estremo interesse sia per l'amatore evoluto che per il principiante desideroso di apprendere, vorrei richiamare ancora una volta l'attenzione del lettore su un aspetto pressoché sconosciuto della spettroscopia solare in alta risoluzione: la misura dei campi magnetici delle macchie solari tramite l'effetto Zeeman. Si tratta di un'applicazione negli anni passati di esclusiva competenza professionale, ed oggi effettuata da sofisticate apparecchiature negli osservatori e sui satelliti. Raggiungere tale obiettivo con mezzi modesti può quindi considerarsi fonte di grande soddisfazione per l'astrofilo.

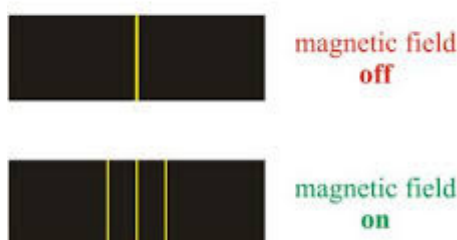
Il metodo da me seguito, che illustrerò tra poco, è in linea di principio il più semplice, l'osservazione dei campi magnetici delle macchie solari in luce non polarizzata che non necessita di ulteriore strumentazione aggiuntiva, e di ulteriori spese rispetto a quelle sostenute per la costruzione di uno spettroeliografo. L'uso di polarizzatori e di lame ritardanti a $\frac{1}{4} \lambda$ in vetro comporta una complicazione nella configurazione dello strumento ed una spesa non indifferente, (ca 700 €) che ho ritenuto di evitare, perlomeno in una fase iniziale di questa grande avventura. In ogni caso, l'errore attribuibile al mancato uso delle lame ritardanti e dei polarizzatori si attesta, sulla base della mia esperienza, intorno al 6-7%, tutto sommato accettabile per osservazioni amatoriali.

Un breve richiamo sull'effetto Zeeman

L'effetto Zeeman consiste nell'allargamento o la divisione in più parti di una riga spettrale per effetto di un campo magnetico. Più in particolare si può definire l'Effetto Zeeman come il fenomeno fisico collegato alla scomposizione dei livelli atomici di energia o delle righe dello spettro dovuta all'azione di un campo magnetico esterno. Pieter Zeeman, il fisico olandese che vinse nel 1902 il premio Nobel per la scoperta dell'effetto che da lui prese il nome, si accorse sperimentalmente che, in presenza di un campo magnetico orientato perpendicolarmente, alcune righe spettrali si scomponevano in tre righe diverse (effetto Zeeman ortogonale) mentre con un campo magnetico orientato parallelamente all'oggetto le righe della scomposizione erano due, e quella centrale scompariva (effetto Zeeman longitudinale).

Successivamente ci si rese conto che la scomposizione era molto più complessa di quanto apparisse e, in relazione allo spin dell'elettrone si parlò di effetto Zeeman anomalo o normale. In astrofisica, l'astronomo americano George Ellery Hale fu il primo ad osservare e riportare in modo ufficiale in un suo articolo del 1908 tale effetto sul campo magnetico delle macchie solari anche se altri astronomi, tra cui Lorenzo Respighi molti anni prima avevano osservato il fenomeno. Oggi lo stesso effetto viene sfruttato per ottenere magnetogrammi della superficie solare con strumenti altamente sofisticati come l'HMI di SDO od altre strumentazioni.

*) Hale, G. E. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 20, No. 123, p.287



Se la riga è in emissione si parla di effetto diretto, mentre se è in assorbimento, di effetto Zeeman inverso. Dal punto di vista dell'astronomia amatoriale, il fenomeno in questione è molto difficile da osservare per il semplice fatto che richiede poteri risolutivi spettrali molto elevati (a mio avviso > 60.000) ed una certa dimestichezza con le righe dello spettro solare per l'individuazione delle righe del ferro interessate al fenomeno, tra cui in primis quelle FeI a 6173 ed a 6302 Å. La registrazione dell'effetto Zeeman sulle righe dello spettro solare in presenza dei forti campi magnetici delle macchie costituisce quindi una vera sfida per l'amatore che si occupa di spettroscopia e per la sua strumentazione.

I miei primi esperimenti sono stati effettuati con lo spettroeliografo Hires Solarscan in modalità spettrografo ed una camera DMK 41, con sensore Sony da 1280 x 1024 su montatura Losmandy G 11. Tale strumento, pur essendo in pratica equivalente a VHIRSS come progetto (configurazione Littrow, reticolo da 2400 l/mm, ottica ED 80/600), è stato realizzato con criteri professionali ed è eccellente sotto tutti gli aspetti, anche per l'uso di un piccolo rifrattore alla fluorite Takahashi 60/355, lo strumento è inoltre comandabile direttamente da PC in tutte le sue funzioni. Tuttavia per un compito talmente difficile occorreva potenziarne ancor di più le caratteristiche e potenzialità. La fenditura originale è stata quindi sostituita con una fenditura fissa da 5 micron, acquistata da Edmund Optics, rivelatasi di ottima fattura. Tale scelta si è dimostrata un'arma vincente, in quanto mi ha fatto ottenere un notevole guadagno in risoluzione spettrale, che ha superato $R = 100000$ con l'applicazione del solito filtro wavelet allo spettro. Da uno strumento di tali dimensioni e peso sinceramente non si poteva pretendere di più.

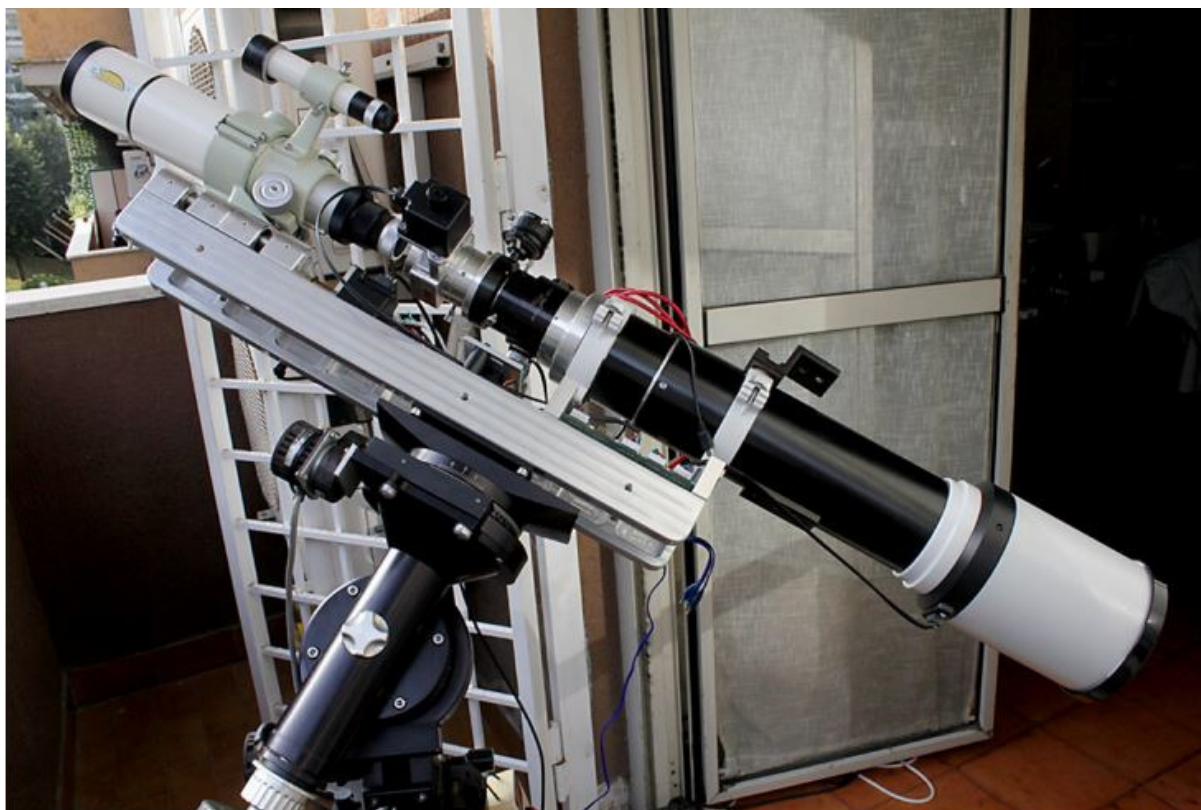
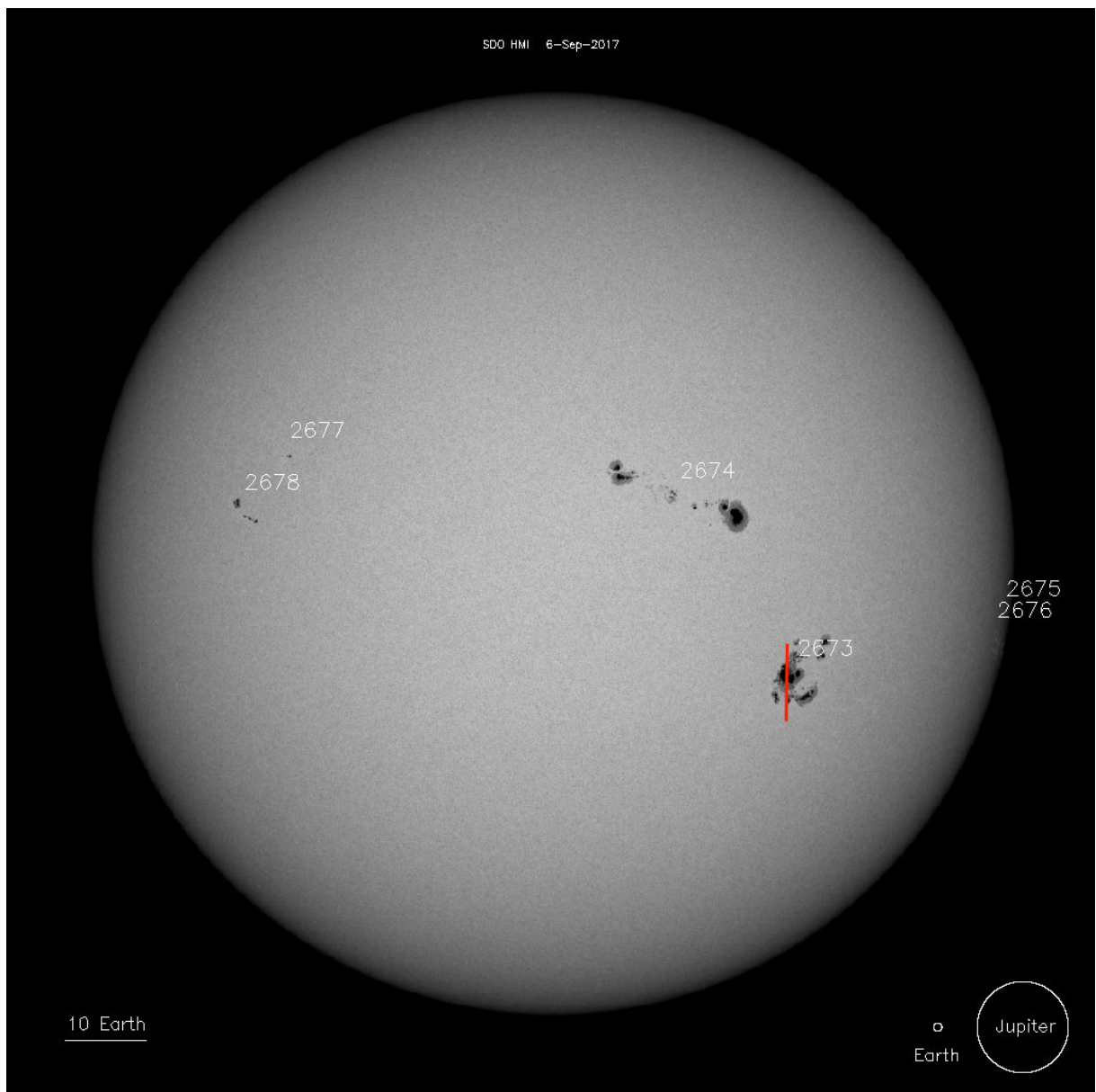


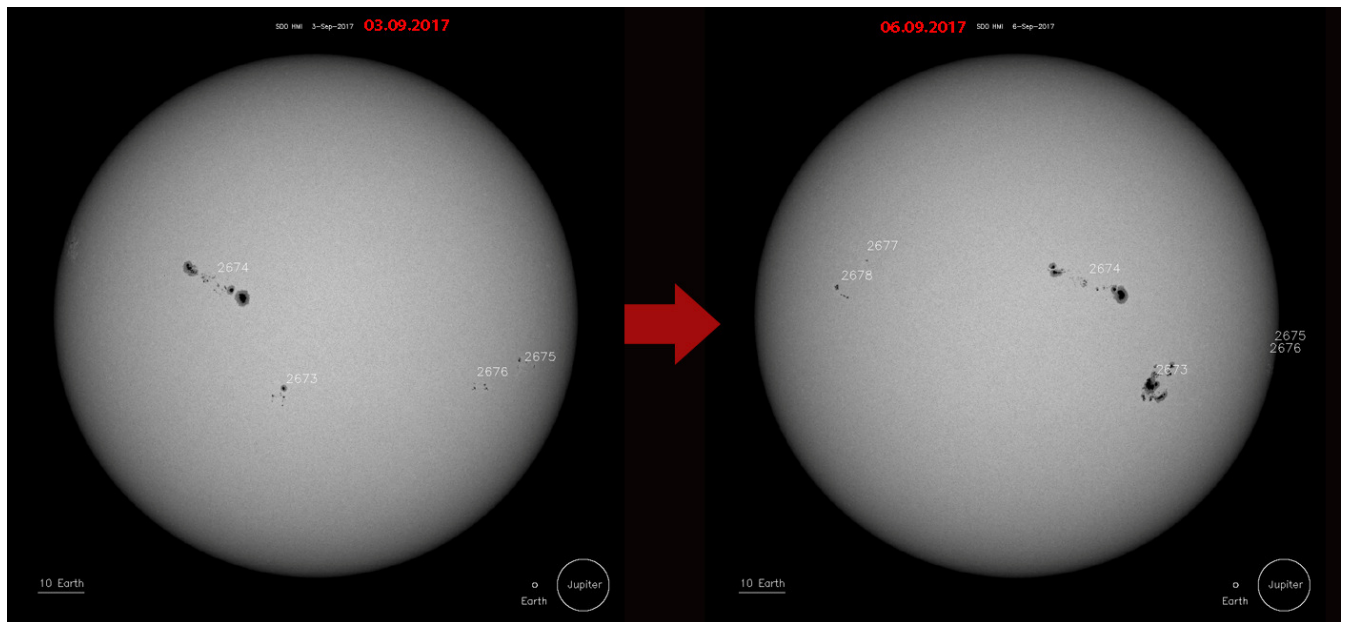
Immagine di Solarscan

Un esempio di rilevamento dell'effetto Zeeman

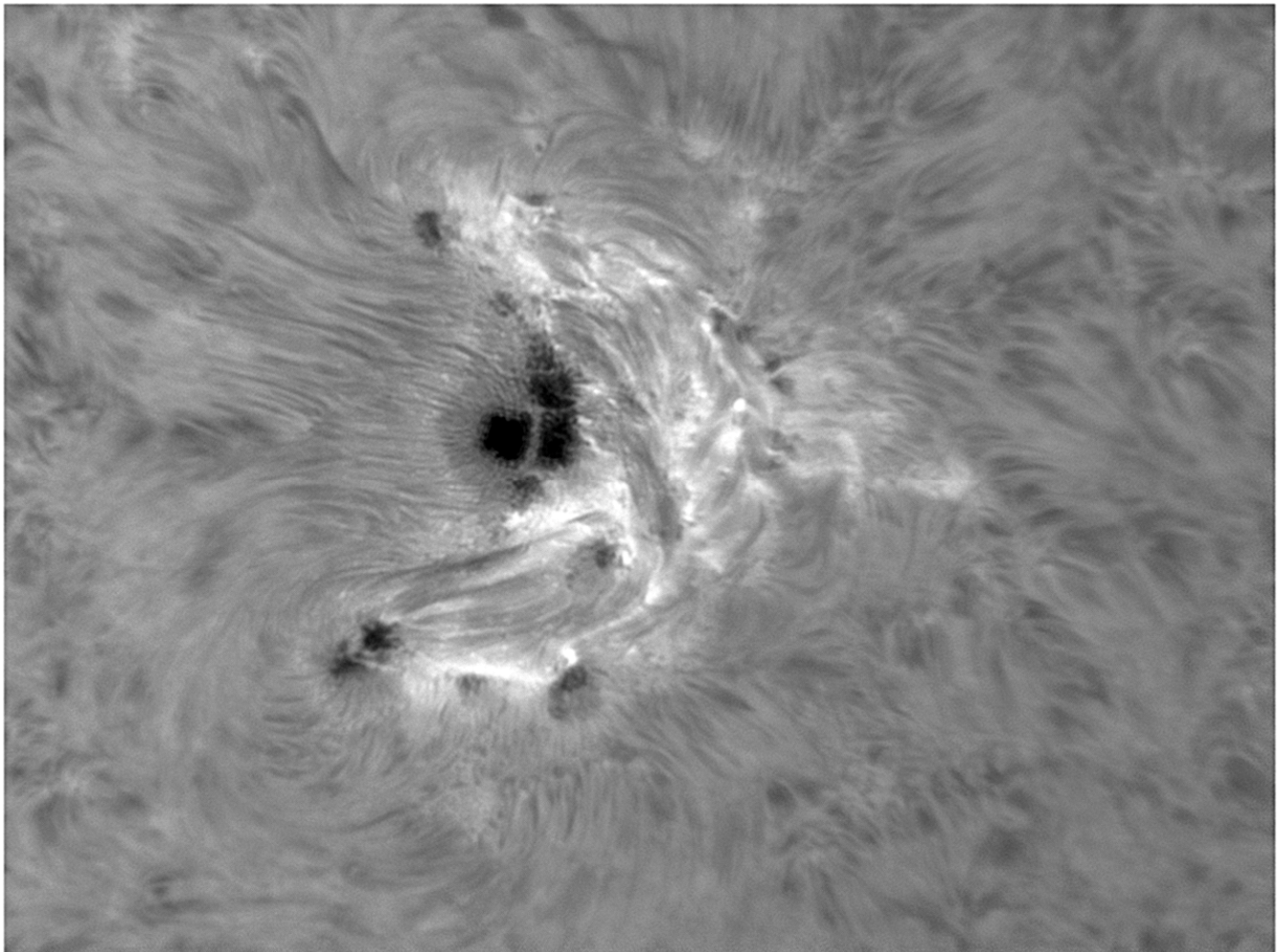
Richiamo il caso di quella che si è rivelata la macchia solare più intensa del 2017, la AR 2673, la cui osservazione fu effettuata il 6 settembre 2017. Tale macchia, facente parte di una regione attiva piuttosto complessa come si osserva nella figura sottostante (SDO-HMI) nella quale è anche riportata la posizione della fenditura nel corso dell'osservazione.



La caratteristica di tale macchia fu quella di presentare in soli tre giorni, uno sviluppo veramente notevole, come si osserva nell'immagine che segue (fonte SDO -HMI)

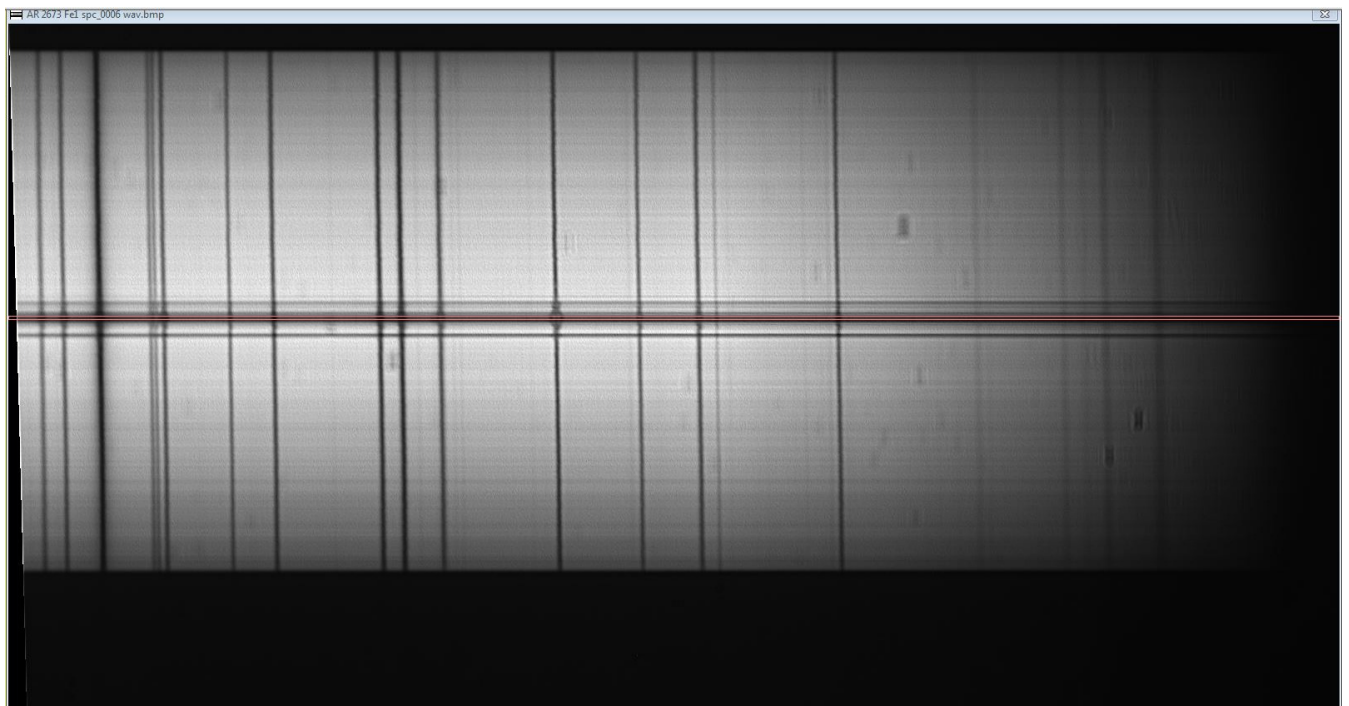


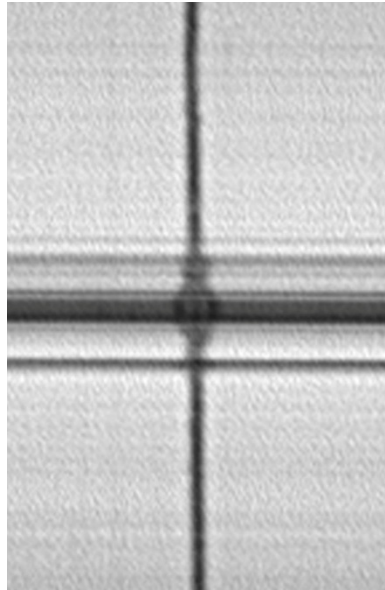
Evoluzione temporale dell'AR 2673 nei tre giorni dal 3 al 6 settembre 2017.



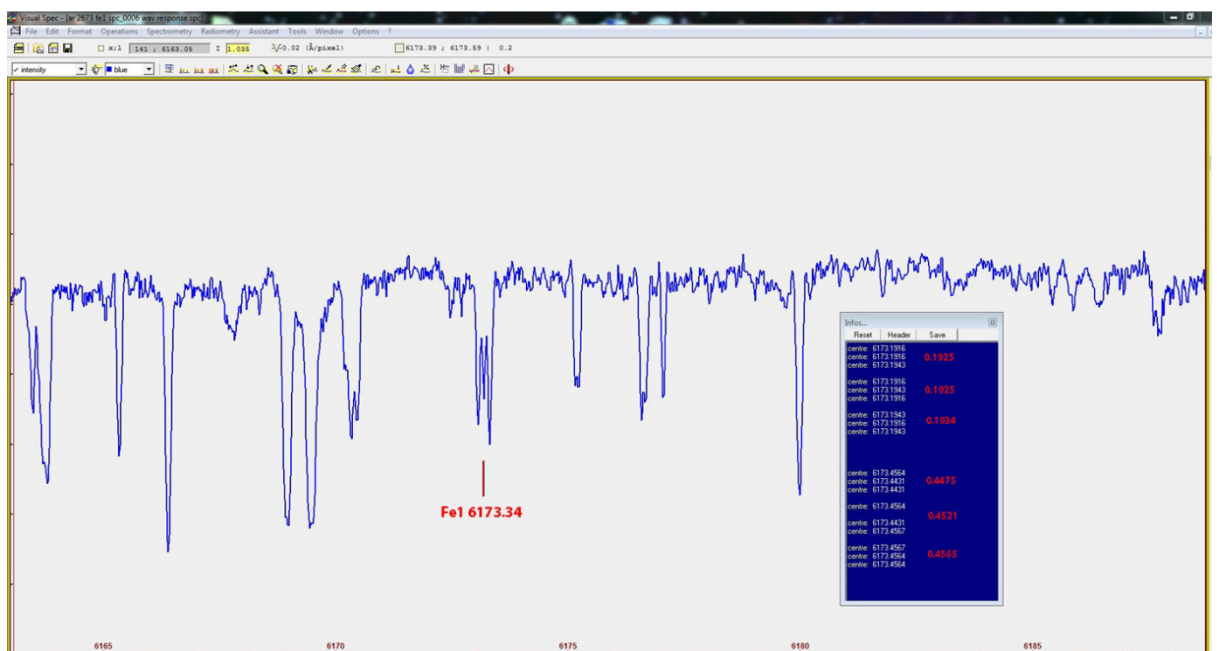
Sopra: la complessa attività intorno alla macchia 2673: foto dell'autore in luce Halph.

La riga dello spettro scelta è stata quella del FeI a 6173 Å. Per l'acquisizione dei filmati è stata usata una camera I.S.DMK 41, con 1280 x 1024 pixel, e la dispersione è stata di 0.02 Å /pixel. Lo spettro sulla riga si presentava come segue: la riga trasversale centrale più intensa è apparenza della macchia centrale sullo spettro, mentre le righe più sottili erano le altre macchie del gruppo :La doppia riga color arancio indica la posizione del binning, ovvero della zona dello spettro sulla quale si è operata la misura del campo magnetico.





Particolare ingrandito della precedente, nella quale si nota molto bene lo splitting Zeeman in tre parti distinte della macchia centrale (riga trasversale più grande), ed anche quello, di intensità inferiore, delle altre macchie del gruppo (righe trasversali più piccole).



Il profilo spettrale di Visual Spec usato per il calcolo del campo magnetico, nel quale appaiono nettamente, da manuale, le tre cuspidi dello splitting Zeeman ortogonale della riga.

Di seguito, la formula teorica applicata.

La relazione tra $\Delta\lambda$ ed il campo magnetico B è:
the relation between $\Delta\lambda$ and the magnetic field B is :

$$(1) \quad \Delta\lambda = \frac{\pi \cdot e}{m_e} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot g \cdot B$$

$$(2) \quad \Delta\lambda = 4.67 \cdot 10^{-13} \cdot \lambda^2 \cdot g \cdot B$$

dove:

B è il campo magnetico in Gauss
is the magnetic field in Gauss

λ è la lunghezza d'onda della riga;
is the wavelenght of the line

e è la carica dell'elettrone;
is the charge of electron

m_e è la massa dell'elettrone
is the mass of electron

c è la velocità della luce
is the speedy of light

g il fattore di Landè della riga
is the Landè factor of the line

dalla precedente (2) si ottiene:

from the (2) we obtain:

$$(3) \quad B = \frac{\Delta\lambda}{4.67 \cdot 10^{-13} \cdot \lambda^2 \cdot g}$$

Per la riga a 6173.34 Å con un fattore di Landè 2.5 è (valori arrotondati a 1/100) la formula generica è:

$$B = \frac{\Delta\lambda}{\frac{4.67 \cdot 38110127 \cdot 2.5}{10^{13}}} = \frac{\Delta\lambda \cdot 10^{13}}{444935733}$$

Nel caso specifico dell'esempio, essendo $\Delta\lambda = 0.1296$, era:

$$\frac{0.1296 \times 10^{13}}{444935733} = \mathbf{2913 \text{ Gauss}}$$

L'errore statistico

$$\frac{0.002 \times 10^{13}}{444935733} = \mathbf{45 \text{ Gauss}}$$

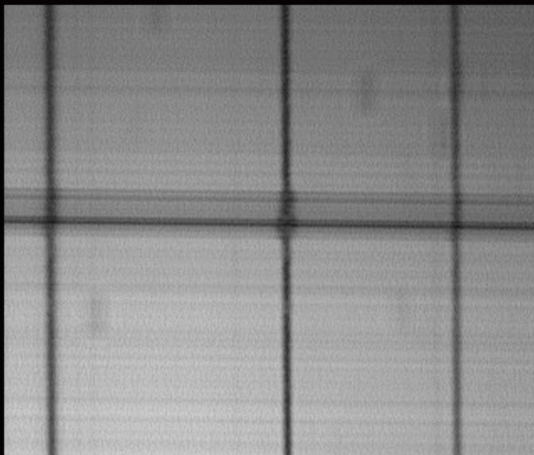
Quindi in definitiva il campo magnetico della macchia dell'esempio riportato restava calcolato in:

$$\mathbf{2913 \pm 45 \text{ Gauss} *}$$

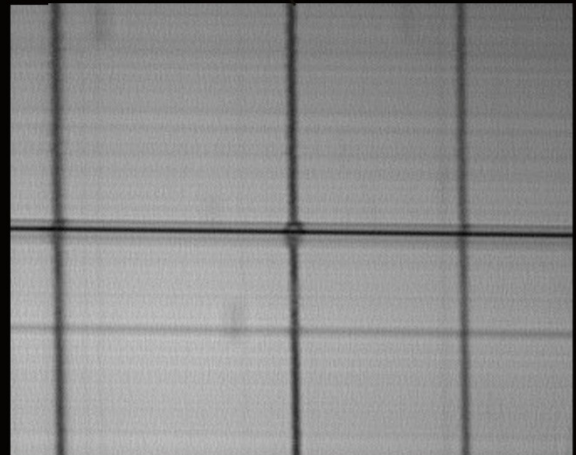
Alcuni esempi recenti

Nelle immagini che seguono lo splitting Zeeman dell'AR 3014 del 20 maggio 2022 e quello delle AR 3053 e 3055 dell' 11 luglio 2022.

**Zeeman effect in non polarized light in AR 3014 sunspot group Solarscan Hires spectrograph-
May, 20,2022 Fulvio Mete- Rome - Italy**



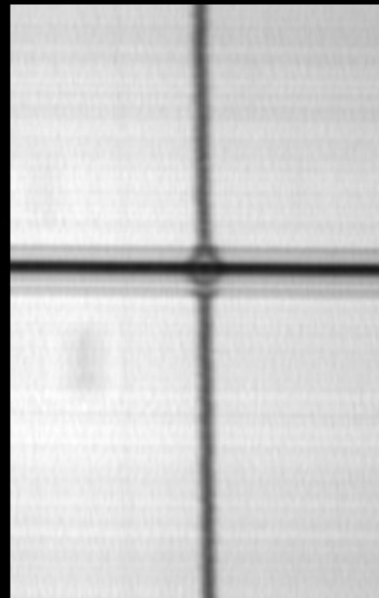
FeI 6173



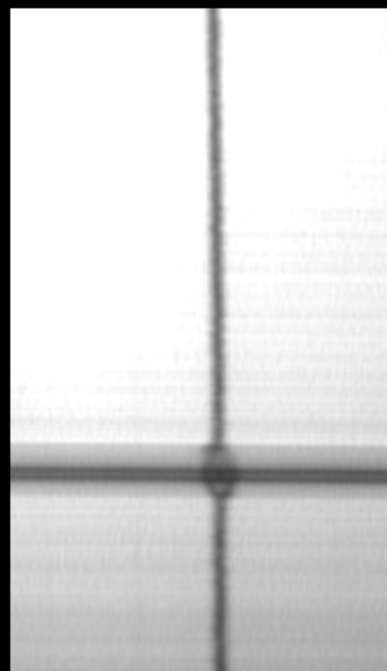
FeI 6173

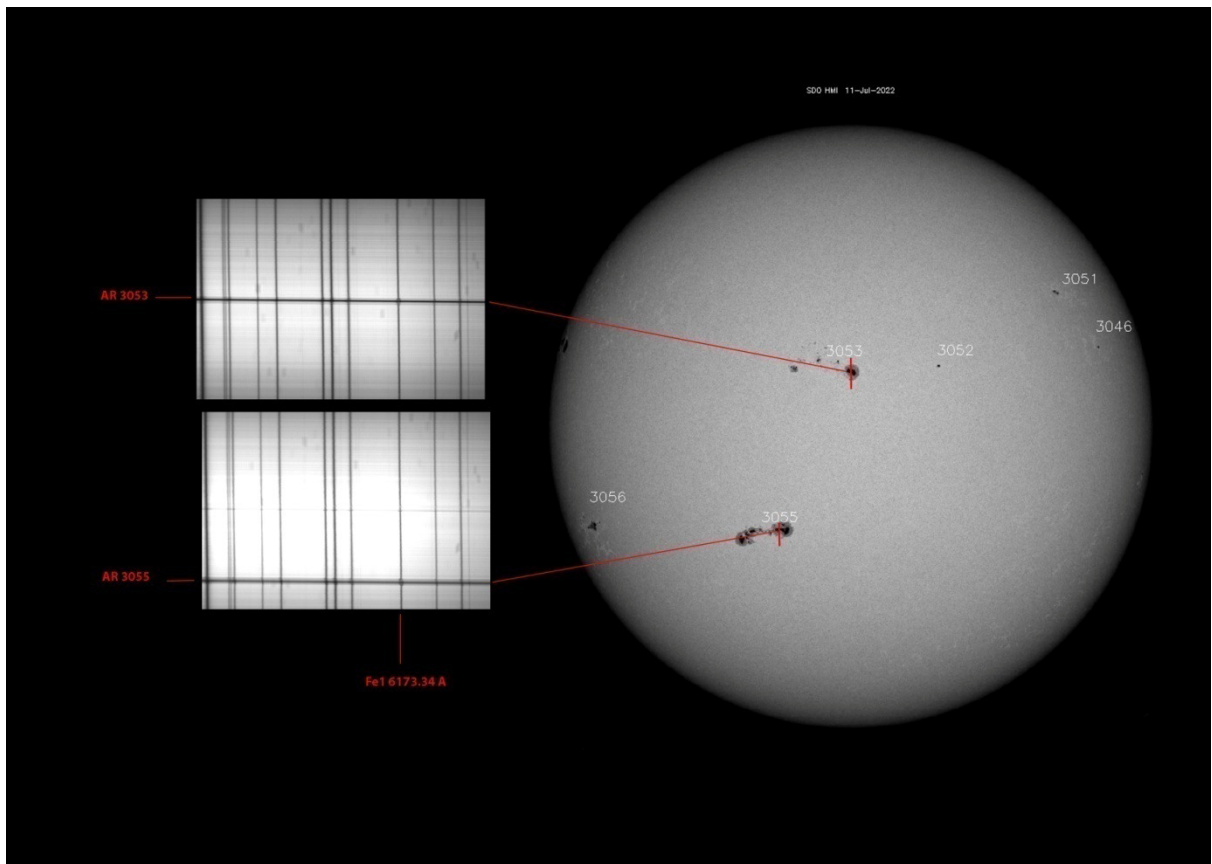
**Zeeman splitting on
sunspots 3053 & 3055
22_07_11 - Solarscan
Fulvio Mete -Rome-Italy**

AR 3053 →



AR 3055 →





Solarscan, così come attualmente configurato, permette di misurare solo le macchie al di sopra di circa 1500 Gauss, ma è tuttavia un potente mezzo d'indagine per finalità una volta appannaggio di alcune Torri solari, come quella dell'Osservatorio di Roma, che aveva svolto tale compito di misurazione dei campi magnetici delle macchie solari negli anni sessanta e settanta del 1900 anche in tandem con quella di Mount Wilson.

Per i dettagli sulle modalità operative del lavoro di misurazione vedere anche l'articolo del sottoscritto sul sito web lightfrominfinity.org al link:

<http://www.lightfrominfinity.org/Osservazioni%20Zeeman%20del%202017/Le%20osservazioni%20Zeeman%20del%202017.pdf>

Conclusioni

Siamo giunti al termine di questa nuova edizione sulle osservazioni solari con la spettroeliografia digitale, e anche stavolta abbiamo visto le possibilità inaspettate e sorprendenti di strumenti costruiti con mezzi poco sofisticati, ma con tanta voglia di riuscire ed entusiasmo.

In una parola, su un piccolo balconcino come quello delle figure di questo testo, possiamo immaginare di aver installato una torre solare di 20 o 30 metri grazie alla quale il Sole , la nostra stella , viene osservata ed esaminata minuziosamente in tutti i suoi aspetti più nascosti con comuni videocamere alla portata di tutte le tasche e grazie ad alcuni sofisticati programmi freeware. E' un'ulteriore dimostrazione di come il progresso dell'informatica abbia inciso profondamente sulle nostre esistenze, rendendo possibile l'inimmaginabile di non solo pochi decenni, ma addirittura di pochi anni addietro.

Vorrei concludere con un saluto a tutti gli astrofili di tutti i paesi che hanno iniziato, e continuano ad alimentare la passione della spettroeliografia, un ringraziamento a coloro che hanno messo a disposizione in forma gratuita sofisticati programmi di costruzione delle immagini, ed un augurio per tutti coloro che qui in Italia o altrove vorranno mettere le loro capacità al servizio di questa branca dell'Astronomia.

Roma, 6 dicembre 2023

Fulvio Mete

Riferimenti:

Fulvio Mete "Spettrografia digitale , una finestra sul sole"

<http://www.lightfrominfinity.org/Libro%20di%20spettroeliografia%20digitale/Spettroeliografia%20digitale.pdf>

L.Higgins " Spectrohelioscope"

<http://spectrohelioscope.org/page2.htm>

Spettroeliografia professionale

<http://bass2000.obspm.fr/home.php> .

C. Buil Sol Ex

<http://www.astrosurf.com/solex/sol-ex-presentation-en.html>

Edmund Optics – Imaging Optics resource guide-

<https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/industry-expertise/imaging-optics/imaging-resource-guide/>

Fulvio Mete -La misurazione spettroscopica dei campi magnetici umbrali delle macchie solari del 2017 The spectroscopic measurement of umbral magnetic fields of sunspots in 2017:

<http://www.lightfrominfinity.org/Osservazioni%20Zeeman%20del%202017/Le%20osservazioni%20Zeeman%20del%202017.pdf>

Vernazza ed altri (Structure of Solar Chromosphere-1981)

I.Ermolli ed altri " Comparison CaII K spectroheliograms time series with an application to solar activity studies" The Astronomical Journal, may, 27 2009.

Study.com - How to Find the Dimension of a Single Slit Using the Spacing in an Interference Pattern – Patrick Walker – Kirsten Wordeman